МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

XIV МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФОТОНИКЕ И ИНФОРМАЦИОННОЙ ОПТИКЕ

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Москва

УДК 535(06)+004(06)
ББК 72г
Н 34

XIV МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФОТОНИКЕ И ИНФОРМАЦИОННОЙ ОПТИКЕ: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2025. – 736 с.

Сборник научных трудов содержит доклады, включенные в программу XIV Международной конференции по фотонике и информационной оптике, проходившей 29–31 января 2025 г. в г. Москве. Тематика конференции охватывает широкий круг вопросов: когерентная и нелинейная оптика, оптика кристаллов, волоконная и интегральная оптика, взаимодействие излучения с веществом и оптические материалы, оптическая связь, цифровая оптика и синтез дифракционных оптических элементов, голография и оптическая обработка информации, оптоэлектронные устройства, прикладные вопросы оптики.

Ответственный редактор Родин В.Г.

Статьи получены до 1 декабря 2024 года.
Материалы издаются в авторской редакции.

ISBN 978-5-7262-3127-3

© *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2025*

Подписано в печать 22.01.2025. Формат 60×84 1/16.
Печ. л. 46. Изд. № 002-3. Тираж 60 экз. Заказ №2.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Типография НИЯУ МИФИ
115409, Москва, Каширское ш., 31

Программный комитет конференции

Председатели:
Гуляев Ю.В. – Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва
Евтихиев Н.Н. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

Вениаминов А.В. – Университет ИТМО, Санкт-Петербург
Вишняков Г.Н. – Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва
Волостников В.Г. – Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН
Драчев В.П. – Сколковский институт науки и технологий, Москва
Козлов С.А. – Университет ИТМО, Санкт-Петербург
Комоцкий В.А. – Российский университет дружбы народов, Москва
Компанец И.Н. – Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва
Криштоп В.В. – Пермская научно-производственная приборостроительная компания
Кульчин Ю.Н. – Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток
Кутанов А.А. – Институт физико-технических проблем и материаловедения НАН Кыргызской Республики, Бишкек
Лавров А.П. – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Потатуркин О.И. – Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск
Ромашко Р.В. – Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток
Рябухо В.П. – Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов
Сазонов С.В. – Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва
Стариков Р.С. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Твердохлеб П.Е. – Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск
Толстик А.Л. – Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь
Фетисов Ю.К. – МИРЭА – Российский технологический университет, Москва
Шандаров С.М. – Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Организационный комитет конференции

Председатель:
Кузнецов А.П. - Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Злоказов Е.Ю. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Козлов А.В. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Краснов В.В. - Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Небавский В.А. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Овчинников А.С. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Рымов Д.А. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Савченкова Е.А. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Свистунов А.С. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Черёмхин П.А. - Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Шифрина А.В. - Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Ученый секретарь:
Родин В.Г. - Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Адрес в Интернет: http://fioconf.mephi.ru/

СОДЕРЖАНИЕ

ПОТЁМКИН Ф.В., МАРЕЕВ Е.И., КУЛИКОВ А.Г., ПИСАРЕВСКИЙ Ю.В., БЛАГОВ А.Е., КОВАЛЬЧУК М.В.
Лазерно-индуцированная структурная динамика и нестационарные процессы в веществе, регистрируемые рентгенооптическими методами..... 31
ПРОХОРОВ А.В., ЧЕРНИКОВ А.С., ШЕСТЕРИКОВ А.В., ГУБИН М.Ю., СЮЙ А.В., ПОПОВ А.А , ШАЛЫГИНА О.А., ХОРЬКОВ К.С., КОЧУЕВ Д.А., АРСЕНИН А.В., ЦЕЛИКОВ Г.И., ВОЛКОВ В.С.
Лазерный синтез квантоворазмерных структур на основе новых оптических материалов: лаборатория в пробирке.....35
ШИПУЛИН А.В.
Формирование экосистемы в области производства и применения фотонных интегральных схем.....37
ТРИБЕЛЬСКИЙ М.И.
Наночастицы как многофункциональные элементы субволновой оптики.....39
ШУР В.Я., АХМАТХАНОВ А.Р., ЧУВАКОВА М.А., ЛИСЬИХ Б.И., КОСОБОКОВ М.С., БОЙКО А.А.
Нелинейные фотонные кристаллы: сегнетоэлектрики с периодической доменной структурой.....41
ДАДЕНКОВ И.Г., ТОЛСТИК А.Л., МИКСЮК Ю.И., САЕЧНИКОВ К.А.
Фазовые преобразования световых полей в кристаллах силленитов.....43
ДОЛГАНОВ П.В., БАКЛАНОВА К.Д., ДОЛГАНОВ В.К.
Двумерные фотонные кристаллы на основе хиральных жидких кристаллов....45
ПАНТЕЛЕЕВА Е.П., МЕЛЬНИКОВА Е.А., ГОРБАЧ Д.В., ТОЛСТИК А.Л.
Использование твист-планарного нематического жидкокристаллического элемента для определения фазовой топологии оптических вихрей.....47
ЖУРАВЛЕВ В.А., КОЗЛОВ А.А., ДЕМИН В.А., МОСКАЛЕВ Д.Н., КРИШТОП В.В.
Экспериментальное исследование анизотропии показателя преломления тонкоплёночного ниобата лития.....49
АНИСИМОВ Р.И., КОЛМАКОВ А.А., КОМОВ Э.В., ШАНДАРОВ С.М.
Двухпучковое самовоздействие на фоторефрактивных голограммах в диффузионной структуре $LiNbO_3$:Cu.....51
ГОРДЕЕВА А.И., КОРНИЛИЦЫН А.Р.
Управление протонным обменом термогравитационной конвекцией при изготовлении планарных волноводов на кристаллах ниобата лития.....53
МОЛЧАНОВА А.Д., АЛЛАХВЕРДИЕВ К.Р.
Фазовые переходы в двумерных сегнетоэлектрических кристаллах $TlGaSe_2$...55
ПАРАМОНОВ Г.С., СЫЧУГИН С.А., БАКУНОВ М.И.
Генерация терагерцового излучения раздвоенным лазерным пучком.....57

ГАФУРОВА Л.В., ГАЛЮК К.А., СИРОТКИН А.А., БАГДАСАРОВ В.Х., ОВЧАРЕНКО Б.Д.
Генерация ИК-излучения в кристалле ZnSe: Fe с накачкой цугом наносекундных импульсов.....59
РЫЖОВ А.С., ЩЕРБИНИН Д.П., РОМАНОВА А.В., ИВАНОВ А.В.
Исследование термостабилизации лазерных кристаллов $YAl_3(BO_3)_4$.....61
АНИКЕЕВА В.Е., БОЛДЫРЕВ Н.Ю., СЕМЁНОВА О.И., ПОПОВА М.Н.
Спектроскопическое исследование монокристалла перовскита $CsPbBr_3$.....63
ШУКЛОВ И.А.
Синтез коллоидных квантовых точек с новыми реагентами – прекурсорами халькогенов.....65
ТАРАСЕВИЧ Е.А., ЛОЗИНГ Н.А., ГЛАДУШ М.Г.
Кооперативная фотолюминесценция двух примесных органических молекул.....67
БЕЛОВ М.П., ГЛАДКИХ А.Ю., ПОПОВ В.В., ФРОЛОВ А.Ю., УТОЧНИКОВА В.В., ФЕДЯНИН А.А.
Усиление фотолюминесценции лантанидных комплексов с помощью плазмонных кристаллов.....69
МИЛЕНКОВИЧ Т., ШУКЛОВ И.А., ХАКИМОВ К.Т., ПОПОВ В.С.
Исследование замены лигандов и влияние на фотоэлектрические свойства тонких слоёв коллоидных квантовых точек селенида ртути.....71
КОНОНОВ Д.В., БОРОДИНА Л.Н., КОЧАКОВ А.В., ПАЛЕХОВА А.В., ЛЕОНОВ Н.Б., ФИЛАТОВ Н.А., БУКАТИН А.С., ДАДАДЖАНОВ Д.Р., ВАРТАНЯН Т.А.
Усиление хемилюминесценции люминола в присутствии металлического покрытия внутри микрофлюидного чипа.....73
КОРОЛЕВА Т.В., ХАКИМОВ К.Т., МИЛЕНКОВИЧ Т., ШУКЛОВ И.А., ПОПОВ В.С.
Синтез квантовых точек теллурида ртути с доращиванием для MWIR диапазона.....75
МУРАТОВ Д.А., НИКОЛАЕВ Н.Э., ЧЕХЛОВА Т.К.
Сравнение оптических свойств композитных сред, содержащих смесь медных и золотых наночастиц.....77
КОЧАКОВ А.В., МИТУСОВА К.А., КОНОНОВ Д.В., ДАДАДЖАНОВ Д.Р.
Спектроскопия абляционных золотых наночастиц в макрофагах лейкемии.....79
СЮЙ А.В., ЗАВИДОВСКИЙ И.А., ЦЕЛИКОВ Д.И., МАРТЫНОВ И.В., СИДОРОВ Н.В., ПАЛАТНИКОВ М.Н., АРСЕНИН А.В., ВОЛКОВ В.С.
Синтез аморфных наночастиц ниобата лития.....81
ИЗБАСАРОВА Э.А., ГАЗИЗОВ А.Р., ПУДОВКИН М.С.
Биосенсор на основе коллоидных наночастиц $CeYTbF_3$, связанных с плазмонными лигандами.....83
РОЗЕНТАЛЬ С.Р., КИСЛОВ Д.А., ШАЛИН А.С.
Оптический луч притяжения для суперрассеивающих наночастиц.....85

СОБОЛЕВА Е.В., РУДЫЙ С.С., ЩЕРБИНИН Д.П., ИВАНОВ А.В.
Исследование бистабильной динамики микро- и наночастиц в гибридной ионной ловушке.....87
МАКИН В.С., МАКИН Р.С.
Связанные ортогональные решётки в керровском волноводе, индуцированном УКИ лазерного излучения среднего ИК-диапазона.....89
БУРМИСТРОВ Е.Р., АВАКЯНЦ Л.П.
Эффективная масса основных носителей заряда в светодиодных гетероструктурах InGaN/GaN с решетчатым затвором по данным THz-TDS...91
МАМЯН К.А., НЕЦВЕТАЕВ А.А., ФРОЛОВ А.Ю., ФЕДЯНИН А.А.
Когерентное управление направлением светового пучка с помощью трапециевидной дифракционной решётки.....93
ШЕСТЕРИКОВ А.В., ГУБИН М.Ю., ПРОХОРОВ А.В.
Частотно-настраиваемое метазеркало на основе тримеров наночастиц из дихалькогенидов переходных металлов.....95
НЕРОВНАЯ А.А., ФРОЛОВ А.Ю., ФЕДЯНИН А.А.
Оптическое пространственное дифференцирование при помощи плазмонных кристаллов.....97
ГОЛОДУХИНА А.Н., ШИТИКОВ А.Е., ЛОБАНОВ В.Е., ЧЕРМОШЕНЦЕВ Д.А., БИЛЕНКО И.А.
Рамановские оптические частотные гребёнки в интегральных резонаторах из нитрида кремния.....99
ГУБИН М.Ю., ШЕСТЕРИКОВ А.В., АРСЕНИН А.В., ВОЛКОВ В.С., ПРОХОРОВ А.В.
Управление спектральными особенностями растягиваемых кремниевых метаповерхностей с квазизапертыми модами.....101
ШУЛЫНДИН П.А., РУМЯНЦЕВ Б.В., МИГАЛЬ Е.А., ПУШКИН А.В., ПОТЁМКИН Ф.В.
Роль вынужденного излучения плазмы в процессе генерации второй гармоники в газе в присутствии сильного терагерцового поля.....103
ЛЕВУСЬ М.В., РИЗАЕВ Г.Э., ПУШКАРЕВ Д.В., СЕЛЕЗНЕВ Л.В.
Энергетические характеристики терагерцового излучения из плазмы одноцветного филамента..... 105
РУМЯНЦЕВ Б.В., МИГАЛЬ Е.А., ПУШКИН А.В., ПОТЁМКИН Ф.В.
Генерация гармоник высокого порядка при воздействии фемтосекундного лазерного излучения ближнего ИК-диапазона на газовую среду в поле малопериодного интенсивного терагерцового излучения.....107
ФАДЕЕВ С.В., ПЛЕХАНОВ А.А., МОЛЬКОВ Т.С., МАРТЫНОВ И.Л., ЧИСТЯКОВ А.А.
Детектирование органических соединений с помощью терагерцовых метаматериалов.....109
МИГАЛЬ Е.А., ПУШКИН А.В., ПОТЁМКИН Ф.В.
Высокоэффективная генерация чётных оптических гармоник в условиях нарушения симметрии интенсивным терагерцовым полем.....111

НОВИКОВ В.Б.
Управление пространственно-временными оптическими вихрями методом чирпирования.....113
ВАШУКЕВИЧ Е.А., ГОЛУБЕВА Т.Ю.
Параллельные перепутывающие операции над ансамблем двухкубитных систем на основе многомодового светоатомного взаимодействия.....115
ДУШАНИН А.П., ДАНИЛИН А.Н., ЮНУСОВ Т.Р., МАСАЛОВ А.В., ЧЕРМОШЕНЦЕВ Д.А., БИЛЕНКО И.А.
Фазовая бистабильность и сжатие квантовых шумов вырожденного оптического параметрического осциллятора в интегральном резонаторе с кубической нелинейностью.....117
ДАРИНСКИЙ А.Н.
Невзаимное распространение поверхностных электромагнитных волн в магнитооптических структурах..... ...119
БРЮКВИНА Д.А., ДМИТРИЕВ Н.Ю., ШИТИКОВ А.Е., ЧЕРМОШЕНЦЕВ Д.А., ЛОБАНОВ В.Е., БИЛЕНКО И.А.
Анализ вероятности солитонных состояний в интегральных кольцевых микрорезонаторах.....121
СИЛИН А.А., КОРОЛЕВ С.Б.
Универсальная генерация сжатых состояний Фока в N-мерном интерферометре в схеме с измерениями числа частиц.....123
ЦУКАНОВ А.В., КАТЕЕВ И.Ю.
Нанофотонный светоделитель на квантовых точках с фёрстеровской связью.....125
ПЕТРОВ Н.И.
Молния как естественный источник рентгеновских и гамма-фотонов.....127
БАГРОВ А.Р., БАШКИРОВ Е.К.
Динамика теплового перепутывания в нерезонансной трёхкубитной модели Тависа–Каммингса с керровской нелинейностью посредством многофотонных процессов..... 129
ШУТОВА О.А., САДЫРОВА В.Р.
Связь поляризационных и энергетических свойств векторных вихревых пучков.....131
ГАЗИЗОВ А.Р., ИЗБАСАРОВА Э.А., ПУДОВКИН М.С.
Моделирование эффекта Парселла одиночного излучателя в гетероплазмонном нанорезонаторе.....133
СИНГХ Р., ТЕРЕТЁНКОВ А.Е.
Формирование состояний, подобных состояниям котов Шредингера с помощью РДС-кристалла.....135
ВЛАДИМИРОВ А.П., ПАВЛОВ П.В.
К вопросу о создании новых методов и устройств неразрушающего контроля и технической диагностики.....137

БУЛДАКОВА А.В., ШАРИПОВА М.И., ТОЛМАЧЕВА В.В., ФРОЛОВ А.Ю., ФЕДЯНИН А.А.
Разработка перестраиваемых оптических микроустройств на основе фотополимера с магнитными наночастицами.....139
БУРЦЕВ А.А., ИОНИН В.В., КИСЕЛЕВ А.В., ЕЛИСЕЕВ Н.Н., МИХАЛЕВСКИЙ В.А., НЕВЗОРОВ А.А., ГРЕБЕНЕВ В.В., ЛОТИН А.А.
Высокопрозрачные фазоизменяемые материалы на основе селена для реконфигурируемой фотоники.....141
КОЛЧИН А.В., ШУЛЕЙКО Д.В., ЗАБОТНОВ С.В., ГОЛОВАНЬ Л.А., КОЗЮХИН С.А., КАШКАРОВ П.К.
Оптическая анизотропия фазопеременных халькогенидных тонких плёнок, обусловленная фемтосекундным лазерным воздействием.....143
СУДАС Д.П., КУЗНЕЦОВ П.И.
Отжиг нанопокрытий оксида ванадия со структурным фазовым переходом..145
МАКАРОВ П.А.
Расчёт оптических характеристик многокомпонентных неоднородных слоистых структур..... 147
ЖУКОВА М.О., НАБИЛКОВА А.О., МЕЛЬНИК М.В., ИСМАГИЛОВ А.О., ГУСЕЛЬНИКОВ М.С., КОЗЛОВ С.А., ЦЫПКИН А.Н.
Экспериментальные методы оценки нелинейных характеристик материалов в терагерцовом диапазоне частот..... ...149
УРЮПИНА В.К., ЛОСЕВСКИЙ Н.Н., МАЙОРОВА А.М.
Возможности оптотермических ловушек для равномерного распределения микрообъектов на поверхности.....151
КРИВЕЦКАЯ А.А., КУСТОВ Д.М., ЛЕВКИН В.В., ХАРНАС С.С., САВЕЛЬЕВА Т.А.
Исследование интраоперационной динамики уровня кровоснабжения желудка методом спектроскопии диффузного рассеяния.....153
САРАЕВА И.Н., ТОЛОРДАВА Э.Р., ХМЕЛЬНИЦКИЙ Р.А., ШЕЛЫГИНА С.Н., ПОЗДНЯКОВА Д.С., НАСТУЛЯВИЧУС А.Н., КУДРЯШОВ С.И.
Лазерно-абляционная генерация антибактериальных гелей на основе наночастиц: исследования IN VITRO.....155
МАСЛОВА В.А., ЕРМОЛАЕВ Г.А., АНДРИАНОВ Е.С., БАРАНОВ Д.Г.
Влияние шумов на чувствительность биосенсора на основе топологической фазовой сингулярности.....157
ЦЕЛОГОРОДЦЕВ К.А., КОТОВА С.П., ЛОСЕВСКИЙ Н.Н., УРЮПИНА В.К.
Аппаратно-программный комплекс для оптической манипуляции микрообъектами сложной формы.....159
ФОФАНОВ Д.А.
О необходимости применения комплекса технологий радиофотоники для создания современных средств радиоэлектронной борьбы: текущее состояние, перспективы и необходимые первоочередные шаги.....161

ПАРФЕНОВ М.В., ВАРЛАМОВ А.В., ИЛЬИЧЕВ И.В., УСИКОВА А.А., ТРОНЕВ А.В., АГРУЗОВ П.М., ШАМРАЙ А.В.
Тонкоплёночный ниобат лития открывает новые горизонты сверхширокополосной модуляции и терагерцовой интегральной фотоники..165
ПОНОМАРЕВ Р.С., ПАНЬКОВ А.С., ЖУКОВ Л.О.
Сборка фотонных интегральных схем: почему так трудно сделать то, что выглядит так просто.....167
СТАРИКОВ Р.С.
Фотонные интегральные схемы для радиотехнических систем: обзор.....169
ПОПОВ С.М., БУТОВ О.В., РЫБАЛТОВСКИЙ А.А.. РЯХОВСКИЙ Д.В., ЛИПАТОВ Д.С., ЧАМОРОВСКИЙ Ю.К.
Перестраиваемый одночастотный случайный волоконный лазер, работающий в телекоммуникационном диапазоне длин волн.....171
ГАФУРОВ Э.М., ФИЛАТОВА С.А., КАМЫНИН В.А., ЦВЕТКОВ В.Б.
Гольмиевый волоконный лазер ультракоротких импульсов, перестраиваемый в спектральном диапазоне 2070-2095 нм.....173
ЧИРКОВ С.В., СМОЛЯНИНОВ Н.Н., ЕФРЕМОВ В.Д., АНТРОПОВ А.А., ХАРЕНКО Д.С.
Исследование параметров области существования режима синхронизации мод в волоконном лазере на эффекте нелинейной эволюции поляризации....175
ПОПОВ С.М., РЫБАЛТОВСКИЙ А.А.. РЯХОВСКИЙ Д.В., ЛИПАТОВ Д.С., ЕГОРОВА О.Н., ЧАМОРОВСКИЙ Ю.К.
Одночастотный случайный волоконный лазер, работающий в L-диапазоне длин волн.....177
ГАЛЮК К.А., ГАФУРОВА Л.В., СИРОТКИН А.А., ОВЧАРЕНКО Б.Д., БАГДАСАРОВ В.Х.
Лазерные 3 мкм источники с поперечной диодной накачкой.....179
ТАРВАНЕН Д.А.
Применение фемтосекундных лазеров в квантовых технологиях, прецизионной метрологии и терагерцовой оптике.....181
ДИК Т.А., РИЗАЕВ Г.Э., ПУШКАРЕВ Д.В., КОРИБУТ А.В., ЛЕВУСЬ М.В., СЕЛЕЗНЕВ Л.В.
Генерация второй гармоники при филаментации фемтосекундных лазерных импульсов.....183
ЕРШКОВ М.Н., ШЕПЕЛЕВ А.Е., СОЛОХИН С.А.
Исследование генерации компактного лазера с композитным Nd^{3+}:YAG/Cr^{4+}:YAG керамическим элементом.....185
СИНИЧКИНА Ю.А., ГОРБУНКОВ М.В., ЕРМАКОВ В.С., МАСЛОВА Ю.Я.
Моделирование генератора световых импульсов на основе твердотельного лазера с мультигигагерцовой частотой следования и хаотическим распределением амплитуды.....187

МОРОЗОВ Д.В., ВОРОБЬЕВ А.К., ПАВЛОВ В.И., СТЕПАНОВ И.И., ЧЕРМОШЕНЦЕВ Д.А., БИЛЕНКО И.А.
Измерение коэффициентов оптической нелинейности интегральных микрорезонаторов.....189
ПАТОЛЯТОВ А.Д., КОЛЫМАГИН Д.А., ВИТУХНОВСКИЙ А.Г.
Полимерные цилиндрические преломляющие линзы для фокусировки синхротронного излучения.....191
БОРИТКО С.В., НАУМОВ А.Ф.
Одна из причин, приводящая к размытию спектров комбинационного рассеяния.....193
ЗЛОКАЗОВ Е.Ю., КАЗЬМИН М.И., НЕБАВСКИЙ В.А., ТРЕТЬЯКОВ Д.А., СТАРИКОВ Р.С.
Радиофотонная система переноса СВЧ-полосы.....195
ЮШИЦЫНА В.В., КОЛИНЬКО Т.И., ТРИФОНОВА Е.В., ПЛЁНКИН А.П.
Нестандартная топология квантово-криптографической сети.....197
ФИЛИПОВ И.М., ЧИСТЯКОВ В.В.
Гетеродинный приём за счёт повторной фазовой модуляции для систем квантового распределения ключа на непрерывных переменных на боковых частотах.....199
БЫЧКОВ С.Б., КОРОЛЁВ И.С., ТИХОМИРОВ С.В.
Ключевые параметры однофотонных источников и приёмников оптического излучения в квантово-криптографических системах.....201
НАСЕДКИН Б.А., ИСМАГИЛОВ А.О., ОПАРИН Е.Н., ГАЙДАШ А.А., ЦЫПКИН А.Н., КОЗУБОВ А.В.
Влияние температуры оптических элементов на возможность реализации атаки «троянский конь» на системы квантового распределения ключей.....203
ГРИШАЧЕВ В.В.
Модель угроз информационной безопасности волоконно-оптическим системам передачи с защитой на основе квантовой криптографии.....205
КОВАЛЕВ Е.Е., КАЗАКОВ И.А., МАЛАХОВ К.М., ШИПУЛИН А.В., ПАНАИ А., ЕМЕЛЬЯНОВ В.А., РУМЯНЦЕВ И.А.
Интеррогатор на основе дифракционной волноводной решётки для опроса точечных оптических датчиков для применения в составе аэрокосмических аппаратов.....207
ФИЛАТОВ А.Л.
Перспективные направления развития оптических систем геостационарных детекторов молний.....209
ПЯТИБРАТОВ К.А.
Навигация по гравитационному потенциалу с применением атомных часов.....211
ПАНИН Г.Н., КАПИТАНОВА О.О.
Оптоэлектронный мемристорный сенсор на основе низкоразмерных кристаллов для обработки оптической информации.....213

ПРЖИЯЛКОВСКИЙ Я.В., СТАРОСТИН Н.И., МОРШНЕВ С.К., САЗОНОВ А.И.
Линеаризация выходной характеристики дифференциального волоконно-оптического датчика тока.....215
ЕГОРОВ В.К., ЕГОРОВ Е.В., АФАНАСЬЕВ М.С.
Особенности распространения оптических потоков в световодах.....217
ЕРОВЕНКО З.А., МЕЗЕНЦЕВ М.Е., МАРКВАРТ А.А., УШАКОВ Н.А.
Спектральная оптическая когерентная томография с мультиплексированными измерительными зондами.....219
КУЛИК Д.Д., ЛИОКУМОВИЧ Л.Б., УШАКОВ Н.А.
Моделирование сигналов спектральной оптической когерентной томографии.....221
ШИПКО В.В., ТРОШИН О.С.
Обобщённая математическая модель формирования спектральных изображений акустооптической гиперспектральной аппаратурой в условиях помех и искажений.....223
КОТОВ В.М., АВЕРИН С.В., ВОРОНКО А.И.
Вращение плоскости поляризации света, управляемое частотой звуковой волны.....225
НЕЖЕВЕНКО С.С., ЕЖОВА К.В., КУКУШКИН Д.Е.
Использование сингулярного разложения для вычисления фазового запаздывания поляризованного излучения.....227
ЧЕРНОУСОВ Д.А.
Решение задачи фантомной поляриметрии с использованием алгоритмов машинного обучения.....229
ДАВЛЕТШИН Н.Н., ВЬЮНЫШЕВ А.М.
Применение метода фантомных изображений для визуализации микроскопических объектов.....231
БРЕУСОВА А.С.
Применение методики фантомной поляриметрии к изучению анизотропных объектов.....233
ИСМАГИЛОВ А.О., НАСЕДКИН Б.А., ОПАРИН Е.Н., ЛАППО-ДАНИЛЕВСКАЯ А.К., ШУМИГАЙ В.С., ЦЫПКИН А.Н.
Развитие подходов однопиксельной визуализации.....235
БОРЕЙШО А.С., САВИН А.В., СТРАХОВ С.Ю., СУХАНОВ Г.А., ДЖГАМАДЗЕ Г.Т., СОТНИКОВА Н.В.
Оптоинформационный метод субдифракционных угловых измерений.....237
НИКИТИН Н.В., КОЗЛОВ А.В., РОДИН В.Г., СТАРИКОВ Р.С., ЧЕРЁМХИН П.А., ЕВТИХИЕВ Н.Н.
Применение методов компенсации шумов цифровых камер для уменьшения времени регистрации в фурье-птихографии.....239
КУЗЬМИН В.Г., ЧУТРИ К., ФАРЕХ Р., ДЫЛОВ Д.В.
Распознавание образов за пределами оптического разрешения с помощью фурье-птихографии и нейронных сетей.....241

ДОСКОЛОВИЧ Л.Л., СОШНИКОВ Д.В., МОТЗ Г.А., БЕЗУС Е.А., СКИДАНОВ Р.В.
Дизайн каскадных ДОЭ для оптической классификации изображений и формирования заданных распределений интенсивности.....243
СТАРИКОВ Р.С., ШИФРИНА А.В.
Методы реализации функции нелинейной активации в дифракционных оптических нейронных сетях.....245
КАЙТУКОВ Ч.Б., ЗАЙЦЕВ С.И., СВИНЦОВ А.А.
Формирование скрученных световых пучков в защитных оптических знаках.....247
СЕТЕЙКИН А.Ю., КРАСНИКОВ И.В.
Подходы применения методов математического моделирования в биомедицинской оптике.....249
ПАВЛОВ А.В.
Корреляционное восстановление изображений нелинейными мультиплексными голограммами Фурье.....251
БЫКОВСКИЙ А.Ю.
Структура кодированных словарей параметров сцены для многозначно-логического моделирования систем агентов.....253
КОРОЛЕНКО П.В., КУБАНОВ Р.Т., МИШИН А.Ю.
Спектральные свойства изображений фрактальных структур.....255
ПУТИЛИН А.Н., ДУБЫНИН С.Е., ПУТИЛИН Н.А., КОПЁНКИН С.С., БОРОДИН Ю.П.
Угловые диапазоны работы волноводных голографических перископов в схемах дисплеев дополненной реальности.....257
ШОЙДИН С.А., ПАЗОЕВ А.Л.
Латеральный паттерн структурированного света и голография.....259
ЧЕРНЫХ А.В., РЕЗЦОВ Т.В., ОРЛОВА Т.Н., ПЕТРОВ Н.В.
Одноэкспозиционный поляризационный голографический микроскоп для исследований топологических архитектур в жидких кристаллах.....261
КОЖЕВНИКОВА А.М., АЛЕКСЕЕНКО И.В., ШИТЦ Д.В.
Цифровая голографическая интерферометрия для исследования параметров апокампического разряда.....263
МАНЯК А.П., КРЕТУШЕВ А.В.
Моделирование восстановления фазы динамических объектов в интерференционной микроскопии с использованием временного гильберт-преобразования.....265
БОРОДИНА Л.Н., РАБОШ Е.В., МАРГАРЯН И.В., БАРАНОВ М.А., ПЕТРОВ Н.В., ВЕНИАМИНОВ А.В.
Конфокальная микроскопия структуры объёмной отражательной голограммы.....267
МАРКОВ З.С., МИНИХАНОВ Т.З., ЗЛОКАЗОВ Е.Ю.
Измерение аберраций с помощью когерентного вычислительного метода на основе случайных фазовых масок.....269

ПРОХОРЕНКОВ Н.О., ВОЛЫНСКИЙ М.А.
Гиперспектральная цифровая голография на базе лазера с перестраиваемой длиной волны.....271
РЫМОВ Д.А., ЧЕРЁМХИН П.А., ШИФРИНА А.В., СТАРИКОВ Р.С.
Нейросетевой синтез голограмм 3D-сцен с учётом параметров оптической системы.....273
ВОЙЦЕХОВСКИЙ А.В., ДЗЯДУХ С.М., ГОРН Д.И., ДВОРЕЦКИЙ С.А., МИХАЙЛОВ Н.Н., СИДОРОВ Г.Ю., ЯКУШЕВ М.В.
Электрические характеристики nB(SL)n-структур на основе HgCdTe для LWIR диапазона.....275
БАРУЛИНА Е.Ю., ЧИГЛИНЦЕВ Э.О., ШЕВЯКОВА К.В., АБРАМОВ А.Н., КРАВЦОВ В.А., ЧЕРНОВ А.И.
Изготовление и исследование муаровых сверхрешёток на основе слоёв дихалькогенидов вольфрама.....277
МАРТЬЯНОВ А.К., ТЯЖЕЛОВ И.А., РАЛЬЧЕНКО В.Г., СЕДОВ В.С.
Центры окраски в микрокристаллах CVD-алмаза, легированных оловом.....279
БУХАРОВ Д.Н.
Моделирование поглощательной способности для реализации моделей графитизации искусственного алмаза.....281
ДИРКО В.В., ПЛОТНИКОВ Н.В.
Эпитаксиальный синтез кремния и германия на графите.....283
КУКЕНОВ О.И., МАЙЕР К.А., БУРНАШОВ А.А.
Кинетика формирования сверхструктуры 2xN при эпитаксиальном росте Ge на Si(100) 285
ИЛЬИН С.П., ЗЕЛЕНКОВ Л.Е.
Синтез оптически резонансных микрокристаллов германиевых перовскитов для ап-конверсии инфракрасного излучения.....287
БЕРЕЗОВСКАЯ А.А., ЛЕБЕНКОВА С.К., МИЛЬШИНА Л.Д.
Исследование ап-конверсионных свойств щёлочно-земельных фторидов MeF_2 - ErF_3 (где Me-Ca, Sr) при лазерном возбуждении 802 нм.....289
КУЧЕРЕНКО М.Г., НАЛБАНДЯН В.М., РУСИНОВ А.П.
Влияние магнитного поля на генерацию коллоидного раствора родамина 6Ж с металлическими наночастицами.....291
ГРЕСЬКО В.Р., ДОЛГОПОЛОВ А.Д., СЕРГЕЕВ М.М.
Исследование эффекта лазерно-индуцированного дихроизма в плёнках оксида цинка с наночастицами серебра.....293
УШКОВ А.А., КАЗАНЦЕВ И.С., ЯКУБОВСКИЙ Д.И., СЮЙ А.В., ЦЕЛИКОВ Г.И.
Синтез наночастиц из слоистых ван-дер-ваальсовых материалов методом фемтосекундной абляции и гибридные микроструктуры на их основе.....295
ГЛАДСКИХ А.А., ДАДАДЖАНОВ Д.Р., ГЛАДСКИХ И.А.
Лазерно-индуцированная анизотропия в серебряных массивах наночастиц для применения в качестве защиты против подделок.....297

АЙМУХАНОВ А.К., ЗЕЙНИДЕНОВ А.К., ИЛЬЯСОВ Б.Р., АХАТОВА Ж.Ж., АБЕУОВ Д.Р., ДОСМАГАНБЕТ Е.С.
Влияние наночастиц MoS_2 на вольт-амперные характеристики солнечных элементов.....299
МИРУЩЕНКО М.Д., КОСОЛАПОВА К.Д., ЧЕРЕВКОВ С.А., УШАКОВА Е.В.
Исследование морфологии, энергетической структуры и оптических свойств углеродных наночастиц, обработанных полимерами.....301
КРУЧИНИН Н.Ю., КУЧЕРЕНКО М.Г.
Конформационная структура состоящего из двух разноимённо заряженных фрагментов блока-сополимера, адсорбированного на поляризованной сферической металлической наночастице.....303
ОТПУЩЕННИКОВ Л.А., ГЕЦ Д.С., ЗЕЛЕНКОВ Л.Е.
Допирование нанокристаллов и квантовых точек свинцово-галогенидного перовскита катионами рубидия для применения в нанофотонике и оптоэлектронике.....305
БЕЙСЕМБЕКОВ М.К., ОМАРБЕКОВА Г.И., ЗЕЙНИДЕНОВ А.К., АЙМУХАНОВ А.К.
Влияние среды отжига на морфологические свойства плёнок NiO_x.....307
ИЛЬИНСКИЙ А.В., КАСТРО Р.А., КЛИМОВ В.А., КОНОНОВ А.А., ПРОВОТОРОВ П.С., ТИМОФЕЕВА И.О., ШАДРИН Е.Б., БЕРДНИКОВА А.Д.
Спектрометрия плёнок AgI, легированных Cu.....309
СИГАЕВ А.П., ФИЛИППОВ И.А., ПРОНИН И.А., КАРМАНОВ А.А., ЯКУШОВА Н.Д.
Исследование качественного состава многослойных сегнетоэлектрических плёнок $BiFeO_3$ методом ИК фурье-спектроскопии.....311
ЖУРАВЛЁВ Д.А., КОРНЕЕВА А.А., БЫКОВ А.А., ЗИНИН П.В.
Исследование свойств проводимости алмазоподобных плёнок методом Ван дер Пау.....313
ХУДАЙБЕРГАНОВ Т.А.
Расчёт теплопроводности решётки алмаза.....315
СЕКТАРОВ Э.С., КНЯЗЕВА М.А., ЕРЕМЧЕВ И.Ю.
Исследование оптически стимулированной люминесценции в алмазе с азотными центрами окраски.....317
ЗАХАРЧУК И.А., ДАНИЛКИН М.И., ВОЛЫНЕЦ Н.И., САФИУЛЛИНА П.А., ОСАДЧЕНКО А.В., АМБРОЗЕВИЧ С.А., ДАЙБАГЕ Д.С., БЕЗВЕРХНЯЯ Д.М., СЕЛЮКОВ А.С.
Легирование тербием тетрабората магния с целью создания оптически стимулируемых детекторов ионизирующих излучений.....319
ЛЕБЕНКОВА С.К., МИЛЬШИНА Л.Д.
Определение области существования твёрдого раствора на основе вольфраматов стронция, бария с замещением Er и Yb.....321
МИЛЬШИНА Л.Д., ЛЕБЕНКОВА С.К.
Синтез и определение области существования твёрдых растворов на основе вольфраматов стронция и кальция.....323

МИХАРЕВ Е.А., ЛУНЁВ А.Ю., СИДОРОВ А.И., КОСТИН П.А.
Разработка экспериментальной установки для измерения оптических характеристик в резонаторах МШГ с молекулярными кластерами серебра...325
ЛУНЁВ А.Ю., МИХАРЕВ Е.А., СИДОРОВ А.И., КОСТИН П.А.
Расчёт спектров излучения микросферического резонатора из фосфатного стекла, легированного Er^{3+}.....327
БАРИНОВА О.П., КНЯЗЬКИН Д.Д., РУНИНА К.И.
Синтез и спектральные характеристики алюминатов лития состава $LiAlO_2$ и $LiAl_5O_8$.....329
САМСОНОВА Л.Г., ГАДИРОВ Р.М., КАЗИН Н.А., РУСИНОВ Г.Л.
Фотогенераторы кислоты на основе замещённых бензо(b)тиофен-2-карбоксамидов.....331
ГОРЯЕВ М.А.
Кинетика сенсибилизированных красителем фотопроцессов в кремнии *n*- и *p*-типа.....333
ДОМАРЕВ С.Н., РИДЕР М.А., БОЛТЕНКО А.В., МОИСЕЕВА Е.О., ЦЮРКО Д.Е., ОРЛОВА А.О.
Динамика процесса фотоиндуцированного растворения суперпарамагнитных наночастиц оксида железа.....335
ЛАНТУХ Ю.Д.
Исследование кинетики восстановления исходной формы бактериородопсина в процессе оптической записи.....337
СОКОЛОВА Д.А., СИДОРОВ А.И., ПОДСВИРОВ О.А., ШЕСТАКОВ С.А.
Запись оптической информации в серебросодержащих стёклах электронным лучом.....339
ГАВРИЛОВА Д.А., ГАВРИЛОВА М.А., ЕВСТРОПЬЕВ С.К.
Фотоактивные материалы системы ZnO-$ZnCr_2O_4$ для экологических приложений.....341
БЕЛОВ К.Н., БЕРДНИКОВ А.С., КИРЕЕВ В.Б., КУНДИКОВА Н.Д., ШЕШИН Е.П.
Комбинационное рассеяние света для оценки напряжения в углеродосодержащих катодах.....343
КАРПАЧ П.В., ВАСИЛЮК Г.Т., МАСКЕВИЧ А.А., ГЛЕБОВИЧ Т.С., АЙТ А.О., ГОРЕЛИК А.М., МАСКЕВИЧ С.А.
Гигантское комбинационное рассеяние света в фотохромных наноструктурах на основе наночастиц Ag и молекул хромена.....345
ПОНЯЕВ А.И.
Органические фотохромы для фотоники, систем аккумуляции солнечной энергии и медицины.....347
КУЗЬМЕНКО Н.К., КОЛОБКОВА Е.В., СЕРГЕЕВ М.М., НИКОНОРОВ Н.В.
Исследование процесса модификации фторфосфатной стеклянной матрицы с прекурсорами перовскита под действием ультракоротких лазерных импульсов.....349

ГЕЙНЦ Ю.Э., ПАНИНА Е.К.
Влияние размера и состава пористой оболочки микрокапсулы на основе TiO_2 на эффективность поглощения УФ-излучения.....351
КЛИМЕНКО Д.И., ЧЕРЕВКОВ С.А., БАБАЕВ А.А., СКУРЛОВ И.Д.
Полупроводниковые квантовые двумерные гетероструктуры ближнего ИК-диапазона с пассивированной перовскитом поверхностью.....353
СИДОРОВА М.Н., ЯКУБОВСКИЙ Д.И., ЗАВИДОВСКИЙ И.А., АРСЕНИН А.В.
Создание и характеризация ультратонких золотых кластеров, полученныхна кристаллах MoS_2.....355
СИДОРОВ А.И., ЕЛАНСКАЯ К.Г., НАЗАРОВ А.Н.
Моделирование высокодобротного датчика температуры на основе двумерного фотонного кристалла.....357
БУРДУЛЕНКО О.В., ТАТАРИНОВ Д.А., ЗЕЛЕНКОВ Л.Е.
Исследование оптических свойств двойных бессвинцовых перовскитных микрокристаллов Cs_2TeCl_6, полученных методом кристаллизации под давлением.....359
ВОЛЫНЕЦ Н.И., ДАЙБАГЕ Д.С., БЕЗВЕРХНЯЯ Д.М., ОСАДЧЕНКО А.В., ЗАХАРЧУК И.А., АМБРОЗЕВИЧ С.А., САФИУЛЛИНА П.А., СЕЛЮКОВ А.С.
Оптика нанокристаллов во внешнем электрическом поле.....361
ХОПЁРСКИЙ А.Н., НАДОЛИНСКИЙ А.М., КОНЕЕВ Р.В.
Двухфотонная ионизация *K*-оболочки атомного иона.....363
БЕЗУС Ю.А., ФЕДОРОВ С.А., РУМЯНЦЕВ В.В.
Особенности экситоноподобных возбуждений в неидеальных гексагональных решётках.....365
КУЛАГИНА М.А., ЧЕБАКОВА С.А., ШУМИЛКИНА Ю.Р., ФИЛАТОВ В.В.
Хиральная симметрия поляритонов и её нарушение в кристаллической среде.....367
ХУДАЙБЕРГАНОВ Т.А.
Квантовый принцип подчинения в поляритонном димере.....369
ВОЛКОВА В.В., ФИЛАТОВ В.В.
Оптическая сверхпроводимость при комнатных температурах, вызванная двухполяритонными состояниями в фотонном кристалле.....371
ВАСИЛЬЕВА О.Ф.
Самозахват в системе экситон-поляритонов.....373
АЛЕКСЕЕНКО П.О., ВОЛКОВА В.В., ГАВРИЛОВЕЦ Д.А., КОТОВА А.Д., ФИЛАТОВ В.В.
Дисперсия, рефракция и хиральность электромагнитных волн в фотонном кристалле.....375
АСТАШКЕВИЧ С.А.
Моделирование щёлочно-содержащей резонансной фотоплазмы в плоскопараллельной газовой ячейке.....377
АСТАШКЕВИЧ С.А., КУДРЯВЦЕВ А.А.
Определение фотоЭДС в плоскопараллельной Na-Ar газовой ячейке.....379

ТИМКИНА Ю.А., АЛЕЙНИК И.А., МИРУЩЕНКО М.Д., УШАКОВА Е.В.
Разработка фотоактивного слоя на основе квази-2D хирального перовскита для детектирования циркулярно-поляризованного излучения.....381
АВДЕЕВ П.Ю., ЛЕБЕДЕВА Е.Д., АЛФЕРЬЕВ А.Л., КЛИМОВ А.А., КАРАШТИН Е.А., ГУСЕВ Н.С., САПОЖНИКОВ М.В., БУРЯКОВ А.М.
Магнитоэлектрическое управление генерацией терагерцового излучения в структуре W/FeGa/Pt на подложке PMN-PT.....383
ЧИНЬ Н.Х., ЩУКО А.В., ПАТАПОВИЧ М.П.
Применение метода сдвоенных лазерных импульсов для определения содержания макро- и микроэлементов в составеразличных исследуемых образцов.....385
БОРОДИНА Л.Н., КОНОНОВ Д.В., ПАЛЕХОВА А.В., ДАДАДЖАНОВ Д.Р., ВЕНИАМИНОВ А.В., ВАРТАНЯН Т.А.
Конфокальная визуализация усиления люминесценции люминола вблизи плазмонной метаповерхности в микрофлюидном чипе.....387
ЧИНЬ Н.Х., ЩУКО А.В., ЛУКЬЯНОВ В.К., ПАТАПОВИЧ М.П.
Создание оловосодержащих наноструктур на различных поверхностях методом лазерной атомно-эмиссионной спектрометрии.....389
МАКОВЕЦКИЙ А.А., ПОПОВ С.М., РЯХОВСКИЙ Д.В., ЗАМЯТИН А.А.
Возбуждение гибридной моды многомодового оптического волокна с наибольшим азимутальным числом (с наибольшей каустикой).....391
АСТАШКЕВИЧ С.А., ВИНОГРАДОВ И.А., МАШЕК И.Ч., РОГАЛЕВ С.Д., СВАТИКОВА П.Д.
Интерферометрическая привязка лазера к резонансным переходам щелочных металлов.....393
КОЗЛОВ А.В., ЗАГОРУЛЬКО К.А., ХАТЫРЕВ Н.П.
Численное сравнение измерения RIN-лазеров по сигналу биений при оптическом гетеродинировании и классическим методом.....395
АСТАШКЕВИЧ С.А., ВИНОГРАДОВ И.А., МАШЕК И.Ч., РОГАЛЕВ С.Д., СВАТИКОВА П.Д.
Моделирование параметров натриевого слоя ионосферы Земли для лидарных приложений.....397
СЕНЧУРОВА А.В., СИРОТКИН А.А., КАЛАЧЁВ Ю.Л.
Влияние возбуждения и девозбуждения ионами Nd^{3+} на излучение Ho^{3+} с длиной волны 3.9 мкм.....399
ТЕРПИЦКИЙ А.Н., РЕШЕТОВ И.В., ЩЕРБАК С.А., КААСИК В.П., ЛИПОВСКИЙ А.А.
Генерация второй оптической гармоники на одномерных периодических структурах в силикатном стекле.....401
ВОРОПАЙ Е.С., КОВАЛЕНКО М.Н., АЛЕКСЕЕНКО Н.А., ЗАЖОГИН А.П.
Исследование процессов при напылении наноплёночных резисторов из оксидов меди, легированных железом, при лазерном распылении меди и железа в атмосфере воздуха.....403

ЕРМАЛИЦКАЯ К.Ф., ВОРОПАЙ Е.С., КРАСНОПЕРОВ Н.Н., ЗАЖОГИН А.П.
Исследование процессов напыления газочувствительных наноплёночных резисторов из оксидов железа при лазерном распылении железа в атмосфере воздуха.....405
КОВАЛЕНКО А.Ф.
Варианты импульсного лазерного отжига диэлектрических пластин с наночастицами металлов.....407
ОРЕХОВА Н.А., АБРАМЕНКО Е.В., МАРТЫНОВА М.А., ЗАЖОГИН А.П.
Исследование процессов пробоя сталей методом лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектрометрии.....409
МЕЛЕХОВ А.П., БУСЫГИНА И.А., ГРИГОРЬЕВА И.Г., ВОВЧЕНКО Е.Д., КОЗЛОВСКИЙ К.И., САЛАХУТДИНОВ Г.Х.
Спектральный состав рентгеновского излучения в вакуумном разряде с лазерным инициированием на катоде или аноде.....411
МОЖАЕВА М.Д., КОРШУНОВ А.А., ГАРМАТИНА А.А., МАРЕЕВ Е.И., АСАДЧИКОВ В.Е., МИНАЕВ Н.В.
Оптимизация потока рентгеновских фотонов при создании микрофокусного лазерно-плазменного источника с использованием различных газовых сред.....413
ЕРМАЛИЦКАЯ К.Ф., ВОРОПАЙ Е.С., КРАСНОПЕРОВ Н.Н., ЗАЖОГИН А.П.
Исследование процессов напыления газочувствительных наноплёночных резисторов из оксидов титана при лазерном распылении титана в атмосфере воздуха.....415
ЕРМАЛИЦКАЯ К.Ф., ВОРОПАЙ Е.С., КРАСНОПЕРОВ Н.Н., ЗАЖОГИН А.П.
Исследование процессов образования оксидов при формировании поверхности титановой мишени сериями сдвоенных лазерных импульсов в атмосфере воздуха.....417
РЕШЕТОВА М.В., ЕПИФАНОВ Е.О., МИНАЕВ Н.В., ЦВЕТИНОВИЧ Ю., ГОРИН Д.А.
Формирование функциональных микроструктур подобных диатомовым водорослям методом двухфотонной полимеризации.....419
ОРЕХОВА Н.А., ПУХТЕЕВ А.О., ХАРИТОНЧИК Р.А., ЗАЖОГИН А.П.
Исследования образцов железных метеоритов методом лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектрометрии.....421
РАДНАТАРОВ Д.А., ЖУЛАНОВА П.В., ГРОМОВ И.В., КОБЦЕВ С.М.
Формирование оптических поверхностей свободной формы методом направленного травления холодной плазмой.....423
ДЕРИМЕДВЕДЬ Д.К., МАРЕЕВ Е.И., ЕПИФАНОВ Е.О., МИХАЛЕВ П.А., МИНАЕВ Н.В.
Получение микроструктур на поверхности сегнетоэлектрических плёнок сополимеров винилиденфторида с использованием лазерного излучения ультрафиолетового диапазона.....425

ТИМЧЕНКО Е.В., РЯБОВ Н.А., ФРОЛОВ О.О., ТИМЧЕНКО П.Е., ВОЛОВА Л.Т., ИВАНОВ С.С.
Оптические методы оценки состава коллагенсодержащего гидрогеля для 3D-биопечати опорных и соединительных тканей.....427
АЛЕШИНА П.А., РОГОЖНИКОВ Г.С.
Модель экспресс-коагуляции биологических тканей интенсивным лазерным излучением при проведении процедуры оптической биопсии.....429
КОРШУНОВ А.А., МОЖАЕВА М.Д., СЕДОВА Ю.К., АШИХМИН Д.И., ЮСУПОВ В.И., МИНАЕВ Н.В., ШАЛЕНОВ А.С.
Создание компактной установки для лазерной инженерии микробных систем.....431
ТИМЧЕНКО Е.В., ТИМЧЕНКО П.Е., АЛЕХИН М.С., ПИСАРЕВА Е.В., ВЛАСОВ М.Ю., ФРОЛОВ О.О., КЛЕНОВА Н.А.
Рамановская спектроскопия для оценки материалов на основе бактериальной биоцеллюлозы в процессе их изготовления.....433
ВОЙТЕШОНОК Ю.В., ШИТЦ Д.В.
Преимущества озонатора на основе эксимерной лампы в приборе обработки септических ран.....435
ТИМЧЕНКО Е.В., ТИМЧЕНКО П.Е., ВОЛОВА Л.Т., ФРОЛОВ О.О., СЕМИБРАТОВА Е.С.
Спектральный анализ капсулы мочевого пузыря после процесса лиофилизации.....437
ШУЛБАЕВА Д.С., СКРЫБЫКИНА А.А., РОГОЖНИКОВ Г.С.
Особенности широкополосного оптического зондирования и анализа данных, полученных при диагностике поверхностных новообразований у животных.....439
РОМАНОВА А.А., БЕЛЯЕВА А.А., БОГАТОВА Е.А., ЧЕКМАСОВ С.П., БУДЫЛИН Г.С., ШИРШИН Е.А., АНДРЕЕВА В.А., ЕВТИХИЕВ Н.Н.
Оптический метод измерения температуры в IN VITRO модели процедуры эндовенозной лазерной коагуляции с радиальным волоконным световодом.441
ЗОТОВА А.В., ТИМЧЕНКО Е.В., ТИМЧЕНКО П.Е., ЛЯМИН А.В., БАЖУТОВА И.В., КАЮМОВ К.А., ФРОЛОВ О.О., ВОЛОВА Л.Т., ТРУНИН Д.А.
Рамановская спектроскопия для идентификации разных штаммов стрептококков.....443
КАРАМЫШЕВА С.П., СЕЛИВАНОВА Л.В., УШАКОВА Е.В.
Изучение фотокаталитических свойств нанокристаллов тройных соединений для фотодинамической терапии.....445
РУДИ П.А., РОГОЖНИКОВ Г.С.
Макет терагерцового спектрометра для анализа срезов биологических тканей.....447
МАЛИКОВ А.Ф., УДЕНЕЕВ А.М., ЯКОВЛЕВ Д.В., КАЛЯГИНА Н.А.
Распределение и фотовыгорание фотосенсибилизаторов на поверхности кожи биологических моделей EX VIVO при облучении в красном диапазоне длин волн.....449

НИКОЛАЕВА И.Н., КОСТРОМЫКИНА В.В., РОГОЖНИКОВ Г.С.
Структурирование поверхностей диэлектриков как способ управления качеством изображения в системах терагерцового видения.....451
БАТУЕВ И.О., СМИРНОВ К.А., МУРЗИНА Т.В., МАЙДЫКОВСКИЙ А.И.
Двухфотонная лазерная печать волноводов и широкополосных элементов ввода и вывода оптического излучения.....453
СОЙФЕР Ф.И.
Влияние электромагнитных полей на оптические кабели без металлических элементов в конструкции.....455
БРАЖНИКОВ М.К., ХАТЫРЕВ Н.П.
Методы квантовой оптики в задачах измерений давления газов в широком диапазоне.....457
КАЛЮНИН А.Д., КЛЕПИКОВ Д.А., НОСОВ И.Ю., ПЧЕЛКИНА Н.В.
Оценка доступности атмосферной оптической связи для Москвы.....459
БАХУС А.В., БОКОВ П.М., ДАНИЭЛС Г.К., КАЗАНЦЕВ С.Ю., САПОЖНИКОВ М.В.
Оценка возможности применения атмосферной оптической связи на объектах использования атомной энергии ЮАР.....461
ПОНОМАРЕНКО Д.М., БЕНГАЛЬСКИЙ Д.М., ХАРАСОВ Д.Р., НИКИТИН С.П., ТРЕЩИКОВ В.Н.
Распределённый акустический датчик с чувствительной линией, удалённой на дистанцию 100 километров.....463
НАНИДЖАНЯН А.К., ЕРОХИН К.Ю., ЯРЫГИН М.А., ПАВЛОВ С.В.
Бюджет квантовой линии связи установки для исследования влияния возмущений оптической плотности атмосферы на передачу квантового ключа.....465
РЕШЕТНИКОВ Д.Д., ВАШУКЕВИЧ Е.А., ГОЛУБЕВА Т.Ю., ПЕТРОВ В.М.
Оценка скорости распределения секретного ключа в спутниковом канале связи на основе пучков с аксиально-симметричной поляризационной структурой.....467
НАНИДЖАНЯН А.К., ТОПОРОВСКИЙ В.В., ИСАЕВА Л.Н.
Возможность увеличения скорости распределения квантового ключа через атмосферу за счёт применения адаптивных оптических систем коррекции волнового фронта.....469
МИЗЯК Л.А., ЛЕВЧЕНКО А.С.
Проблема локализации ошибок в канале связи оптической транспортной сети.....471
АВТАНДИЛОВ К.Ш.
Перспективные направляющие среды для квантовых коммуникаций.....473
БЫЧКОВ С.Б., КОРОЛЁВ И.С., ТИХОМИРОВ С.В.
Исследования источника одиночных фотонов с помощью однофотонного фотодетектора на основе MRS-лавинного фотодиода.....475
ЯРЫГИН М.А., НАНИДЖАНЯН А.К., РАБЕНАНДРАСАНА Ж.
Энергетический бюджет установки квантового распределения ключей.....477

БЫЧКОВ С.Б., КОРОЛЁВ И.С., ТИХОМИРОВ С.В.
Исследования квантовой эффективности однофотонных фотодетекторов с учётом вероятностей темнового счёта и послеимпульсов.....479
ТОПОРОВСКИЙ В.В., ГАЛАКТИОНОВ И.В.
Двухконтурная адаптивная оптическая система для коррекцииаберраций волнового фронта лазерного излучения в условиях турбулентной атмосферы.....481
БЫЧКОВ С.Б., ПОГОНЫШЕВ А.О., ТИХОМИРОВ С.В.
Оптическая рефлектометрия во временной области в режиме счёта фотонов.....483
ГАЛАКТИОНОВ И.В., ТОПОРОВСКИЙ В.В.
Широкоапертурный многоканальный датчик волнового фронта Шака–Гартмана.....485
СОЛОМАТИН О.А., НАСЕДКИН Б.А., ИСМАГИЛОВ А.О., КАЛИНИЧЕВ А.А., ГАЙДАШ А.А., ЦЫПКИН А.Н., КОЗУБОВ А.В.
Влияние отрицательных температур на стойкость систем квантового распределения ключей к атаке «троянский конь».....487
КАЗАНЦЕВ С.Ю., РОМАНОВ К.Р., ЯРЫГИН М.А.
Постобработка просеянных ключей в системах квантового распределения ключа при помощи алгоритма «Каскад» 489
НИКИТИН Н.В., ХАРАСОВ Д.Р., БЕНГАЛЬСКИЙ Д.М., ТРЕЩИКОВ В.Н.
Влияние методов фильтрации на скорость отклика оптоволоконных распределённых температурных датчиков.....491
ТОПОРОВСКИЙ В.В., ГАЛАКТИОНОВ И.В., КУЗЬМИЦКИЙ П.М.
Оптимизация геометрии управляющих элементов биморфного корректора волнового фронта.....493
ЭГАМОВ М.Х., МАХСУДОВ Б.И., РАХИМОВА У.Дж.
Спектроскопические исследования электрооптических параметров ПДЖК плёнок разных концентраций.....495
ЧУБАРОВ Д.М., АЛТУХОВ Ю.А., ДОЛГИРЕВ В.О., РАСТРЫГИН Д.С., ШАРАНГОВИЧ С.Н.
Исследование дифракционных характеристик мультиплексированных двухслойных КПЖК дифракционных структур при считывании линейно-поляризованным световым излучением.....497
ЧУБАРОВ Д.М., АЛТУХОВ Ю.А., ДОЛГИРЕВ В.О., РАСТРЫГИН Д.С., ШАРАНГОВИЧ С.Н.
Преобразование поляризационных характеристик световых пучков электрически управляемыми мультиплексированными МНГДС на основе КПЖК.....499
ДОЛГАНОВ П.В., БАЛЕНКО Н.В., ДОЛГАНОВ В.К.
Фотоиндуцированная трансформация фотонных свойств жидких кристаллов.....501

МАЛЫШКИНА О.В., КАПЛУНОВ И.А., РОГАЛИН В.Е., КРОПОТОВ Г.И.
Сравнение тепловых свойств германия
с различной концентрацией дислокаций.....503
КОМАНДИН Г.А., БУЧИНСКАЯ И.И., КУЗНЕЦОВ С.В., СПЕКТОР И.Е., ФЕДОРОВ П.П.
Оптические свойства монокристаллического CdF_2
в длинноволновой области.....505
МАТВЕЕВА Т.Г., ПУЧКОВ Н.И., СОЛОВЬЕВ В.Г., ЦВЕТКОВ А.В., ЯНИКОВ М.В.
Оптические и электрические свойства нанокомпозита
сегнетова соль/опал.....507
ШАХМИН А.А., ГЕРАСИМОВА В.В., МУСИХИН С.Ф., КРОПОТОВ Г.И.
Поглощение терагерцового излучения
в монокристаллическом кремнии.....509
ГАВРУШКО В.В., ЗАХАРОВ М.А., КАДРИЕВ О.Р., ЛАСТКИН В.А., ПЕТРОВ А.В.
О возможностях формирования спектральной характеристики
кремниевых фотодиодов.....511
ТИТОВ Р.А., СМИРНОВ М.В., КРЫЛОВ А.С., ВТЮРИН А.Н., БИРЮКОВА И.В., МАСЛОБОЕВА С.М., СИДОРОВ Н.В., ПАЛАТНИКОВ М.Н.
Особенности структуры монокристаллов $LiNbO_3$:Zn:Mg
разного генезиса.....513
КУЗЕНКО Д.В.
Температурная зависимость энергии активации диэлектрической
проницаемости и показателя преломления ниобата лития.....515
КАДЕТОВА А.В., ТОККО О.В., ПАЛАТНИКОВ М.Н., ЧИСТЯКОВА С.А.
Изменение дефектной структуры кристаллов ниобата лития
при легировании их диспрозием.....517
ШАНДАРОВ С.М., КИСТЕНЕВА М.Г., АКРЕСТИНА А.С., ДЮ В.Г., КОМОВ Э.В.
Влияние диффузионного легирования медью на спектральную зависимость
усреднённого оптического поглощения в пластинах ниобата лития.....519
СМИРНОВ М.В., ТИТОВ Р.А., СИДОРОВ Н.В., ПАЛАТНИКОВ М.Н., КАДЕТОВА А.В., ТОККО О.В., ПИКУЛЕВ В.Б.
Пороговые эффекты в спектрах фотолюминесценции кристаллов
$LiNbO_3$:Zn:Mg одинарного и двойного легирования.....521
БЕЛЬСКАЯ Д.Е., САВЧЕНКОВ Е.Н., ДУБИКОВ А.В., ШАНДАРОВ С.М.
Брэгговская дифракция эллиптического гауссова пучка на регулярных
доменных структурах с наклонными стенками в кристалле ниобата лития....523
БОБРЕВА Л.А., ТИТОВ Р.А., СМИРНОВ М.В., БИРЮКОВА И.В., МАСЛОБОЕВА С.М., ПАЛАТНИКОВА О.В., ПЯТЫШЕВ А.Ю., СИДОРОВ Н.В., ПАЛАТНИКОВ М.Н.
Сравнительные исследования кристаллов $LiNbO_3$:Zn:Er
разного генезиса.....525

АВЕРИН С.В., ЛУЗАНОВ В.А., ЖИТОВ В.А., ЗАХАРОВ Л.Ю., КОТОВ В.М.
Оптические и электрические характеристики полупроводниковых структур $NiO/LiNbO_3$.....527
ХАЙРУЛЛИН Ф.Н., КОРЕНЬКОВ И.Н., ИВАСЕНКО В.А., БУЛАТОВ С.С., КОЛМАКОВ А.А., АНИСИМОВ Р.И., КОМОВ Э.В.
Агрегирование наночастиц оксида алюминия на поверхности пластины $LiNbO_3$:Cu полями фоторефрактивных голограмм.....529
ДАВЫДОВСКАЯ В.В., НАВНЫКО В.Н., ФЕДОРОВА А.В.
Особенности распространения двумерных линейно-поляризованных световых пучков в фоторефрактивном кристалле SBN.....531
УМАРОВ М.Ф., КАЮМЗОДА А.К.
Оптический метод контроля качества пьезоэлектрических кристаллов $Pr_3Sb_5O_{12}$ и $Nb_3Sb_5O_{12}$.....533
КУЗЬМИН Н.Н., МАЛЬЦЕВ В.В., МОРОЗОВ И.А.
Раствор-расплавная кристаллизация и оптические свойства редкоземельнохромовых ортоборатов.....535
УМАРОВ М.Ф., КОЗИЕВ К.С.
Природа центрального пика в кварце.....537
ГОЛОВИНА Т.Г., КОНСТАНТИНОВА А.Ф., ЗАБЕЛИНА Е.В., КОЗЛОВА Н.С., КАСИМОВА В.М.
Интерпретация результатов измерений спектров пропускания гиротропных одноосных кристаллов Z- и X-срезов.....539
НАВНЫКО В.Н., КУЛАК Г.В., БЛОЦКАЯ Д.С., АМАНОВА М.А., ШАНДАРОВ С.М.
Определение оптимальных условий обращения волнового фронта в кристалле GaAs.....541
МОСКАЛЕВ Д.Н., КРИШТОП В.В.
Межмодовая связь в кольцевых резонаторах на основе тонкоплёночного ниобата лития.....543
ПАВЛОВ В.И.
Оптимизация параметров микрорезонатора из фторида магния для минимизации флуктуаций резонансных частот.....545
ОВЧИННИКОВ К.А., ГИЛЕВ Д.Г., КРИШТОП В.В.
Взаимодействие оптических полей в резонаторно-интерферометрической схеме волоконно-оптического гироскопа.....547
РУДОЙ К.А., ПИКУЛЬ О.Ю.
Анализ движения колец-изохром на коноскопических картинах гиротропных кристаллов при вращении анализатора.....549
МАНУКЯН М.С., СТРОГАНОВА Е.В.
Макет фотонного устройства для двухканальной генерации.....551
СОСУНОВ А.В., ПЕТУХОВ М.И., САВЕЛЬЕВ Е.Д., ШУР В.Я.
Метод определения параметров градиентных канальных протонообменных волноводов в монокристаллах и твёрдых растворах.....553

ПРОХОРОВ В.П., ЯКОВЕНКО Н.А.
Численная аппроксимация технологических параметров градиентных оптических волноводов.....555
КОРНИЛИН Д.А., ПОНОМАРЕВ Р.С., ДЕМИН В.А.
Каплеобразование плавиковой кислоты на оболочке оптического волокна в ходе травления.....557
МОТОВИЛОВ А.А., БОГАЧКОВ И.В.
Использование метода неразрушающего контроля прочности для оценки остаточного ресурса кварцевого оптического волокна.....559
ТИТОВА А.М., ЧЕПУРИН Е.Ф., БЕЛОВ А.С., СКРЫЛЕВ А.А., НЕЖДАНОВ А.В., БОБРОВ А.И., ВОЛКОВ П.В., ШЕСТАКОВ Д.В.
Технология формирования в едином цикле интерферометра Маха–Цендера планарной и рёберной структуры.....561
МОТОВИЛОВ А.А., БОГАЧКОВ И.В.
Прогнозирование остаточного ресурса оптического волокна на основе данных бриллюэновского рефлектометра.....563
ЛАСКАВЫЙ Н.С., ЖУРАВЛЕВ А.А.
Волоконная система управления лазерным лучом для пространственной связи на основе оптической фазированной антенной решётки.....565
ЗЛОКАЗОВ Е.Ю., КАЗЬМИН М.И., НЕБАВСКИЙ В.А., ТРЕТЬЯКОВ Д.А., СТАРИКОВ Р.С.
Собственные состояния «классического» волоконного оптоэлектронного СВЧ-генератора.....567
КАВАЛЕНЯ А.А., ПОЛЯКОВ А.В.
Исследование стабильности частоты рециркуляции в волоконно-оптических датчиках рециркуляционного типа.....569
ГАРМАЕВА Э.В., ГОРЛОВ Н.И.
Шумы в волоконно-оптических датчиках на основе обратного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна.....571
АБРАМОВ А.С., ЛАПИН В.А., МИРОНОВ П.П.
Динамика квазинепрерывной волны с сильной фазовой модуляцией в неоднородном световоде.....573
ЛЯХОМСКАЯ К.Д., НАДЬКИН Л.Ю.
Влияние постоянной распространения на особенности распространения излучения в двумерном PT-симметричном массиве световодов.....575
ВЕКШИН М.М., КУЛИШ О.А.
Разработка интегрально-оптического трёхканального модового мультиплексора на основе элементов направленной связи в стекле.....577
МЕДВЕДЕВ И.Д., КУЗНЕЦОВ А.В., ШАЛИН А.С.
Исключительные точки в фотонной метаповерхности с нарушением симметрии только в плоскости.....579
САВЕЛЬЕВ М.В., ЯЛОВ А.П.
Четырёхволновое взаимодействие в суспензии при сравнимых вкладах температурной и концентрационной решёток.....581

ЧУКОВ В.Н.
Мета-спектроскопии Рэлея и Лауэ–Брэгга–Вульфа при рассеянии поверхностной акустической волны Рэлея на топологических решётках шероховатости.....583
КОРОВАЙ О.В., МАРКОВ Д.А.
Электромагнитные волны в фотонной ромбической решётке.....585
ШМОЙЛОВА С.С., БАГРОВ А.Р., ИВАХНИК В.В.
Четырёхволновое взаимодействие с тепловой нелинейностью в схеме со встречными пучками.....587
МИНИН О.В., МИНИН И.В.
Концепция опорной фазы Соре–Минин–Вебб в дифракционных оптических элементах.....589
ПЕТРОВ Н.И., СОКОЛОВ Ю.М., СТОЯКИН В.В., ДАНИЛОВ В.А., ПОПОВ В.В., УСИЕВИЧ Б.А.
Фотонный спиновый эффект Холла в субволновых дифракционных решётках.....591
МИНИН О.В., МИНИН И.В.
Спиральная зонная пластина на основе концепции опорной фазы Соре–Минин–Вебб.....593
МУХАМЕДЯНОВ А.Р., ЗЯБЛОВСКИЙ А.А., АНДРИАНОВ Е.С.
Параметрическая неустойчивость в двухмодовой оптомеханической системе с особой точкой.....595
МИНИН И.В., МИНИН О.В.
Оптика замерзающих мезоразмерных капель – новое направление в мезотронике.....597
АГРИНСКИЙ М.В., ВОЛЫНКИН В.М., ОТКУПМАН Д.Г.
Создание и применение нетрадиционных оптических материалов с повышенной радиационной устойчивостью.....599
ЛОБАНОВ П.Ю., МЕШКОВ М.Н., САГИТОВ Г.М., СИДОРЮК О.Е.
Автоматизация производственного контроля на операциях шлифовки мембран в прецизионных оптических деталях.....601
ДЕНИСОВ Д.Г., МАШОШИН Д.А.
Сравнительный анализ оптических систем канала подсвета оптико-электронного прибора, регистрирующего рассеянное излучение для контроля качества оптических поверхностей.....603
СЕМЕНОВ А.П., ТАМБОВСКИЙ А.Д., ПАТРИКЕЕВ В.Е., КУДРЯВЦЕВ А.В.
Контроль внеосевых асферических поверхностей с дифракционными оптическими элементами.....605
РОСЧИХМАРОВА Ю.Д., АНЦИФЕРОВ С.А., БУЙКО С.А., ГЛАДКИЙ В.Ю., МАКЕЙКИН Е.Н., МАРКИН С.В.
Алгоритм начального позиционирования сегментированного зеркала на основе Z-сканирования.....607

КОТЛИКОВ Е.Н., ЛАВРОВСКАЯ Н.П.
Оптические константы плёнок ZnSe в видимой и ближней инфракрасной областях спектра.....609
ПОГИБА А.Ю., КОНДРАТОВ А.П.
Интерференция поляризованного света при отражении от многослойной плёнки полипропилена.....611
ПАТРИКЕЕВА Е.Ю., ИЛЬИНА В.В.
Оптика и светотехника в работе кинооператора.....613
ВОЛКОВ В.Г., ГИНДИН П.Д., КАРПОВ В.В., КУЗНЕЦОВ С.А.
Трёхканальный прибор ночного видения.....615
НЕВАЕВ А.Е., ЧИПИЗУБОВА Е.А.
Повышение качества изображения в приборе ночного видения за счёт дихрочного зеркала.....617
ВОЛКОВ В.Г., ГИНДИН П.Д., КАРПОВ В.В., КУЗНЕЦОВ С.А.
Трёхспектральный импульсный лазерный осветитель.....619
БРАЖНИКОВ М.К., БЕЗДИДЬКО С.Н.
Синтез и проектирование оптических систем: современные алгоритмы и программное обеспечение.....621
ЛЕТОВА Е.Ю., ИВАНОВА Т.В., ЗАВГОРОДНИЙ Д.С.
Предварительная обработка изображений и учёт конечного размера тест-объекта при расчёте характеристик качества для производственного контроля оптических систем.....623
ЛАВРОВ А.П., ИВАНОВ С.И.
Формирование пространственного распределения в многомодовом волокне при пространственном шуме на его входе.....625
БУСУРИН В.И., ТЮНИН А.Н., ЖЕГЛОВ М.А., ВАСЕЦКИЙ С.О.
Экспериментальное исследование преобразователя линейного ускорения на основе связанных оптических волноводов.....627
БЕЛОУСОВА А.С., КОТОВ В.М., АВЕРИН С.В.
Двумерная обработка оптических изображений с использованием фильтра из TeO_2, работающего на минимальной частоте звука.....629
РОГОВ С.А., КОТОВ Т.А.
О разрешающей способности когерентных оптических анализаторов спектра с пространственным интегрированием.....631
КРУГЛОВ С.К., ЛУПИН А.В.
Получение и обработка данных рентгенографических снимков для измерения внутренних напряжений в металле.....633
ГАЛАКТИОНОВ И.В., ТОПОРОВСКИЙ В.В.
Визуализатор индикатрис рассеяния оптического излучения Ми и Хеньи–Гринштейна.....635

РУМЯНЦЕВ Б.В., МИГАЛЬ Е.А., ШУЛЫНДИН П.А., ПУШКИН А.В., ПОТЁМКИН Ф.В.
Измерение временной формы интенсивного терагерцевого импульса на основе генерации второй оптической гармоники в газе с применением машинного обучения.....637
САГАТЕЛЯН Г.Р., ПИСКУНОВА Е.Р., СОЛОМАШЕНКО А.Б., АФАНАСЬЕВА О.Л., КУЗНЕЦОВ А.С.
Идентификация цветов на оптическом микроскопе с применением цветового эталона.....639
КУЗНЕЦОВА А.В., ПРОСКУРИН С.Г.
Малоугловое растровое сканирование ОКТ-изображений отпечатка пальца человека на разных длинах волн.....641
ФЕДОРОВ Е.К., ПАВЛОВ И.Н., КОРОЛЬКОВА О.В.
Исследование стратифицированной жидкости методом нарушенного полного внутреннего отражения.....643
МАТВЕЕВ И.П., КОТОВА С.П., ПРОКОПОВА Д.В., ЛОСЕВСКИЙ Н.Н.
Определение жёсткости оптического пинцета при захвате различных объектов.....645
ЖИХОРЕВА А.А., БЕЛАШОВ М.В., БЕЛАШОВ А.В., СЕМЕНОВА И.В., ВАСЮТИНСКИЙ О.С.
Исследование качества восстановления фазовых изображений с использованием фазово-контрастной микроскопии SLIM при различных числовых апертурах освещения образца..... 647
БАБИН М.Д., СОКОЛЕНКО Б.В., ЛЯХОВИЧ (ШОСТКА) Н.В., ЕГОРОВ Ю.А.
Фазовая профилометрия оптически гладких поверхностей на основе сингулярных пучков.....649
КОРОЛЬ Т.К., МАЛЮТИНА Е.В., РЕШЕТНИКОВ Д.Д., ПЕТРОВ В.М.
Исследование искажения волнового фронта под действием фазовых шумов в кольцевом интерферометре с пространственным модулятором света.....651
МАКСИМОВ Д.В., ЯКУБОВ С.И., ЛАПАЕВА С.Н., ХАЛИЛОВ С.И., ТИТОВА А.О., БРЕЦЬКО М.В.
Внеосевая суперпозиция векторных пучков света.....653
МАЛЮТИНА Е.В., КОРОЛЬ Т.К., РЕШЕТНИКОВ Д.Д., ПЕТРОВ В.М.
Исследование влияния двумерных фазовых шумов на условия распространения оптических вихрей.....655
ЯКУБОВ С.И., МАКСИМОВ Д.В., ЛАПАЕВА С.Н., ХАЛИЛОВ С.И., ТИТОВА А.О., БРЕЦЬКО М.В.
Метод формирования векторных вихревых пучков света с помощью DMD..657
КАШАПОВА Д.И., ПРОКОПОВА Д.В., КОТОВА С.П.
Формирование спиральных пучков голографическим методом с учётом аппаратных ограничений.....659
ГАЛАКТИОНОВ И.В., ТОПОРОВСКИЙ В.В.
Методика экспериментальной оценки концентрации частиц в оптически рассеивающей среде.....661

БУТЬ А.И., ЛЯЛИКОВ А.М.
Повышение точности измерений при исследовании восстановленного волнового фронта теневыми методами.....663
ПАВЛОВ И.Н., РАСКОВСКАЯ И.Л., ШИТОВ С.А.
Определение краевого угла смачивания жидкости лазерным рефракционным методом.....665
МАНУЧАРОВ Д.Р., ПАВЛОВ П.В.
Оценка возможности применения метода спекл-диагностики для определения биологического загрязнения авиационного топлива.....667
ПОЛЕТАЕВ Д.А., СОКОЛЕНКО Б.В., БУГАСОВ И.А.
Применение спекл-интерферометрии при исследованиях подлинности картин.....669
КОМОЦКИЙ В.А., ПУСТОВАЛОВ А.В., РАВИН А.Р.
Макет сейсмометра с датчиком колебаний на основе глубокой отражательной дифракционной решётки.....671
ИСМАНОВ Ю.Х., ДЖАМАНКЫЗОВ Н.К., АЛЫМКУЛОВ С.А.
Эффективность брэгговского согласования в объёмных голографических средах.....673
АВЛАСЕВИЧ Н.Т., ЛЯЛИКОВ А.М.
Анализ аберраций оптической системы формирования голограмм периодических структур в некогерентном свете.....675
КУЛАК Г.В., НАВНЫКО В.Н., НИКОЛАЕНКО Т.В.
Дифракция света на голографических фазовых решётках в среде «реоксан» в условиях френелевского отражения.....677
МОГИЛЬНЫЙ В.В., СТАСЕВИЧ Д.Е., ХРАМЦОВ Э.А., ШКАДАРЕВИЧ А.П.
Термостабильность деформационных фоторельефов на поверхности голографических слоёв.....679
ИСМАНОВ Ю.Х.. ТЫНЫШОВА Т.Д.
Синтез мультиплексных голограмм.....681
АВЛАСЕВИЧ Н.Т., ЛЯЛИКОВ А.М.
Остаточные аберрации в восстановленных интерферограммах, полученных методом двухэкспозиционной голографической интерферометрии периодических структур.....683
ИСМАНОВ Ю.Х., ДЖАМАНКЫЗОВ Н.К.
Мультиплексирование голограмм с использованием фазового кодирования.....685
ЖИХОРЕВА А.А., БЕЛАШОВ А.В., БЕЛЯЕВА Т.Н., САЛОВА А.В., ЛИТВИНОВ И.К., КОРНИЛОВА Е.С., СЕМЕНОВА И.В., ВАСЮТИНСКИЙ О.С.
Применение цифровой голографической микроскопии для сравнительного анализа эффективности фотодинамического воздействия на раковые клетки с использованием фотосенсибилизаторов радахлорин и протопорфирин-IX.687
РЕЗЦОВ Т.В., ЧЕРНЫХ А.В., СТЕПАНОВ И.Г., ПЕТРОВ Н.В., ОРЛОВА Т.Н.
Генерация и изучение топологических структур в хиральных нематических жидких кристаллах с помощью цифровой голографической микроскопии....689

БЕЛАШОВ М.В., ЖИХОРЕВА А.А., БЕЛАШОВ А.В., БЕЛЯЕВА Т.Н., САЛОВА А.В., ЛИТВИНОВ И.К., КОРНИЛОВА Е.С., СЕМЕНОВА И.В., ВАСЮТИНСКИЙ О.С.
Анализ точности определения основных морфологических параметров клеток с использованием низкокогерентной цифровой голографической микроскопии и голографической томографии.....691
ФАЩЕВСКИЙ А.П., РЯБУХО В.П.
Статистическое распределение длин волновых цугов немонохроматического света и длина его временной когерентности.....693
ДЕНИСОВ Д.Г., МАШОШИН Д.А.
Исследование степени вырождения квантово-механической ячейки как модели описания частично-когерентного излучения.....695
ПАВЛЕНКО Д.В., СТАРИКОВ Р.С.
О возможностях манипуляции формой максимума взаимнокорреляционной функции при синтезе фильтров с минимизацией энергии корреляции.....697
ВАСИЛЬЕВ С.В.
Обработка изображения на основе роторной характеристики его фазоэнергетического спектра.....699
МАКСИМОВА Л.А., ЛЯКИН Д.В., МЫСИНА Н.Ю., РЯБУХО В.П.
Корреляции волнового поля с широким угловым спектром пространственных гармоник при различных интервалах вариации их фаз.....701
ВОЛКОВ А.А., УШАКОВ Ф.А., ПЕТРОВА Е.К., ЗЛОКАЗОВ Е.Ю.
Экспериментальное исследование характеристик высокоскоростного микрозеркального модулятора света в схеме 4F-коррелятора.....703
БАЛАНДИН Е.К., КОЗЛОВ А.В., ЧЕРЁМХИН П.А., ЕВТИХИЕВ Н.Н.
Исследование метрик оценки качества восстановленных изображений из голограмм.....705
ГАТАТДИНОВ Т.А., ЗЛОКАЗОВ Е.Ю.
Исследование процессов восстановления изображений с компьютерно-синтезированных голограмм в голографическом волноводе.....707
КЕРОВ А.А., КОЗЛОВ А.В., ЧЕРЁМХИН П.А., ШИФРИНА А.В., ЕВТИХИЕВ Н.Н.
Разработка адаптированных фильтров для 3D-фильтрации голограмм.....709
ЯНЬ Ч., ШИШОВА М.В.
Синтез голограммного оптического элемента для автомобильного проектора.....711
ОВЧИННИКОВ А.С., КДЫРБАЕВ А.А., КРАСНОВ В.В., САВЧЕНКОВА Е.А., ЧЕРЁМХИН П.А.
Метод неитеративного квантования голограмм, учитывающий гистограмму интенсивности.....713
СВИСТУНОВ А.С., КОЗЛОВ А.В., ЧЕРЁМХИН П.А., ЕВТИХИЕВ Н.Н.
Особенности численного восстановления изображений с цифровых голограмм, записанных при различном уровне освещённости....715

ДРОЗДОВ М.К., РЫМОВ Д.А., СВИСТУНОВ А.С., ШИФРИНА А.В., СТАРИКОВ Р.С.
Восстановление бинарных цифровых контейнеров данных с цифровыхи компьютерных голограмм на основе свёрточной нейронной сети....717
КИРИЙ С.А., СВИСТУНОВ А.С., РЫМОВ Д.А., СТАРИКОВ Р.С., ЧЕРЁМХИН П.А.
Восстановление изображений с цифровых и компьютерных голограмм с использованием генеративно-состязательной нейросети....719
ВОЛКОВ А.А., ЗЛОКАЗОВ Е.Ю., ПАВЛЕНКО Д.В., ПЕТРОВА Е.К., ФАЗЛИЕВ Т.Ш., СТАРИКОВ Р.С.
Экспериментальная реализация голографических фильтров, формирующих максимум взаимнокорреляционной функции заданной формы в 4F-схеме....721
ОСИЧЕВА А.Ю., ШАХМАТОВ А.Ю., СЫЧ Д.В.
Применение методов машинного обучения в вычислительной однопиксельной визуализации и классификации рукописных цифр....723
КОЗЛОВ А.В., ОВЧИННИКОВ А.С., ЧЕРЁМХИН П.А., РОДИН В.Г.
Модифицированные методы оценки шумов цифровых камер, исходя из регистрации одного снимка....725

Именной указатель авторов....727

Ф.В. ПОТЁМКИН[1,2], Е.И. МАРЕЕВ[1,2], А.Г. КУЛИКОВ[1],
Ю.В. ПИСАРЕВСКИЙ[1], А.Е. БЛАГОВ[1], М.В. КОВАЛЬЧУК[1]
[1]*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»*
[2]*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННАЯ СТРУКТУРНАЯ ДИНАМИКА И НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ВЕЩЕСТВЕ, РЕГИСТРИРУЕМЫЕ РЕНТГЕНООПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

В работе приведён обзор по тематике исследования нестационарных процессов, инициируемых в конденсированном веществе при лазерном воздействии с умеренной (до 10^8 - 10^9 Вт/см^2) и высокой интенсивностями (более 10^{11} Вт/см^2). Создание лазерно-синхротронного центра НИЦ «Курчатовский институт» позволило предложить подходы к проведению лазерно-синхротронных экспериментов класса накачка-зондирование на новом уровне с диагностикой рассматриваемых процессов в динамике в сверхширокoм временном окне (от фемтосекунд до микросекунд). Это подтверждается успешной регистрацией лазерно-индуцированных процессов структурной перестройки кристаллической решётки кремния и ниобата лития, легированного ионами железа, на наносекундной временной шкале. Перспективы направления связаны с исследованием сверхбыстрого (пикосекундный интервал времен) отклика вещества на резонансное воздействие лазерного излучения различного спектрального состава и интенсивности, который становится возможным благодаря разработанному сверхширокодиапазонному источнику лазерного излучения (от ультрафиолетового до терагерцевого).

F.V. POTEMKIN[1,2], E.I. MAREEV[1,2], A.G. KULIKOV[1],
YU.V. PISAREVSKY[2], A.E. BLAGOV[1], M.V. KOVALCHUK[1]
[1]*National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow*
[2]*Lomonosov Moscow State University*

LASER-INDUCED STRUCTURAL DYNAMICS AND NONSTANIONARY PROCESSES, REGISTERED BY OPTICAL METHODS

The paper presents an overview of the study of non-stationary processes initiated in condensed matter by laser irradiation with moderate (up to 10^8 - 10^9 W/cm^2) and high intensities (more than 10^{11} W/cm^2). The creation of the Laser Synchrotron Center of the National Research Center «Kurchatov Institute» made it possible to propose approaches to laser-synchrotron experiments of the pump-probe class at a new level with diagnostics

of the processes under consideration in dynamics in an ultra-wide time window (from femtoseconds to microseconds), which is confirmed by the successful registration of laser-induced processes of structural rearrangement of the crystal lattice of silicon and lithium niobate doped with iron ions on a nanosecond time scale. Prospects are associated with the study of ultra-fast (picosecond time interval) response of a substance to resonant action in various spectral ranges with controlled intensity of action, which becomes possible thanks to the developed ultra-wide-range source of laser radiation (from UV to THz).

Исследование структурных превращений в веществе на естественных пространственных и временных масштабах является основой для создания природоподобных технологий и развития современных подходов в материаловедении, создании новых материалов с заданными свойствами [1]. Импульсное лазерное излучение обладает необходимыми характеристиками по сверхбыстрому возмущению и диагностике вещества, предоставляя возможность за счёт гибко изменяемых параметров в эксперименте (длительность, условия фокусировки, плотность энергии, интенсивность) реализовывать условия обратимой и необратимой структурной перестройки вещества. Использование же рентгеновского импульсного излучения предоставляет доступ к прямому наблюдению за этими процессами в динамике. Совмещение в лазерно-синхротронном центре НИЦ «Курчатовский институт» этих двух каналов, оптического и рентгеновского, дало совершенно новое качество экспериментов класса накачка–зондирование с возможностью наблюдения за нестационарными процессами в веществе, в том числе находящегося в экстремальных условиях, обусловленных воздействием сверхинтенсивных лазерных импульсов, на сверхшироком временном интервале от фемтосекунд (характерные времена сверхбыстрого движения атомов) до микросекунд (характерные времена термодиффузионных процессов) [2, 3].

В работе измерения осуществлялись в схеме оптическая накачка – рентгеновское зондирование. Лазерное излучение синхронизировалось с периодом следования электронных банчей в кольцевом накопителе синхротрона. Накопительное кольцо синхротрона КИСИ-Курчатов работало в N-банчевом режиме ($N = 75$) с периодом обращения орбиты накопителя $T = 414$ нс. Каждый пучок имел длительность примерно 140 пс. В нашей экспериментальной схеме высокочастотный генератор кольцевого накопителя, работающий на частоте 2,415 МГц, служил внешним тактовым сигналом для системы на основе ПЛИС, обеспечивая надежную синхронизацию всех сигналов с электронными банчами. Затем

частота управляющего сигнала прореживалась до 5 Гц для запуска лампы и управления электрооптическим затвором наносекундного лазера с варьируемыми временными задержками между ними [2]. Временная задержка между лазерным и рентгеновским импульсами варьировалась с субнаносекундным шагом в диапазоне вплоть до сотен микросекунд. Чтобы получить полную динамику дифракционного пика, такие временные развертки регистрировались для нескольких (вплоть до девяти) угловых положений на кривой дифракционного отражения (КДО). Данные результаты можно представить на трёхмерной тепловой карте, где вдоль оси X приведена задержка между лазерным и рентгеновским импульсами, а вдоль оси Y отложен угол отстройки θ [2 - 6].

В результате удалось впервые продемонстрировать, что релаксация фотоиндуцированного (интенсивность ~ 10^{11} Вт/см^2, плотность энергии до 1 кДж/см^2, длительность ~ 6 нс) возбуждения кристаллической решётки кремния проходит в три этапа (рис. 1). На наносекундном масштабе времени начинается формирование микрократера и генерируется ударная волна. Распространение ударной волны с давлением ~десятки ГПа на фронте волны приводит к уширению рентгеновской дифракционной кривой качания, что обусловлено лазерно-индуцированным фазовым переходом через каскад нестабильных при окружающих условиях фазовых превращений (Si-II/Si-XI), происходящих на микросекундном временном масштабе. На субмиллисекундном масштабе доминируют процессы термодиффузии и рекристаллизации, а соответствующая этой стадии наблюдаемая динамика кривой рентгеновского качания дает возможность восстановить температуру решётки, которая достигает ~ 7000 К. Столь высокие температуры разрушают фазы, образовавшиеся на предыдущих стадиях, и полиморфные фазы Si-III, Si-XII наблюдаются только на периферии зоны лазерного воздействия, где температура недостаточно высока для отжига сформированных фаз. Кроме того, совместный анализ картины рентгеновской дифракции и спектров комбинационного рассеяния рассматриваемых объектов показывает, что имеется небольшое количество фазы, которую можно было бы отнести к Si-II, ранее считавшейся нестабильной при атмосферном давлении [3].

Для кристаллов ниобата лития впервые зарегистрирована необычная задержанная во времени реакция рентгендифракционных характеристик на оптическое возбуждение (рис. 2). Отклик кристаллов на оптическое воздействие состоял в обратимом изменении параметров КДО − сдвиге положения пика и уменьшении интегральной интенсивности, наблюдаемых в течение ~ 35 нс после воздействия импульса. Динамика

амплитуды деформаций кристаллической решётки указывает на процесс формирования и последующего распада двойного электрического слоя за счёт направленной миграции фотоэлектронов вследствие объёмного фотовольтаического эффекта (ОФВЭ) [4, 6]. Установлена зависимость эффекта от азимутального поворота образца относительно линейной поляризации лазерного излучения. Эта зависимость хорошо коррелирует с поляризационными характеристиками фотовольтаического эффекта [5].

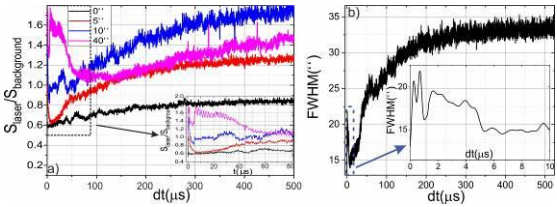


Рис. 1. Динамика изменения сигнала КДО при различных углах (a) и динамика изменения ширины КДО кремния при воздействии на поверхность кремния интенсивного наносекундного лазерного импульса (b)

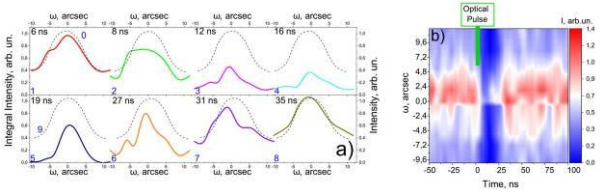


Рис. 2. Динамика изменения КДО при воздействии на ниобат лития, легированного железом, интенсивного наносекундного лазерного импульса (a, b)

Перспективы развиваемого научного направления в дальнейшем связаны с исследованием сверхбыстрого (на пикосекундном временном интервале) отклика конденсированного вещества на резонансное воздействие лазерного излучения различного спектрального состава и интенсивности, который становится возможным благодаря разработанному сверхширокодиапазонному источнику лазерного излучения (от УФ до ТГц) [7].

Список литературы

1. Ковальчук М.В. // Вестник РАН, 2019. Т. 89. С. 455-465.
2. Potemkin F.V., et al. // Rev. Sci. Instrum. AIP Publishing. 2021. V. 92, P. 053101.
3. Kovalchuk M.V., et al. // Crystallogr. Reports. 2022. V. 67. P. 717-728.
4. Kovalchuk M.V., et al. // Crystallogr. Reports. 2024. V. 69. P. 221-229.
5. Marchenkov N., et al. // Optics. 2024. V. 5. P. 1-10.
6. Pilyak F.S., et al. // Phys. Rev. B. 2024. V. 110. L100302.
7. Потёмкин Ф.В. // Бюллетень ф.ф. МГУ. 2023. № 3. С. 24-25.

А.В. ПРОХОРОВ[1,2], А.С. ЧЕРНИКОВ[1], А.В. ШЕСТЕРИКОВ[1,2], М.Ю. ГУБИН[1,2], А.В. СЮЙ[3,4], А.А. ПОПОВ[5], О.А. ШАЛЫГИНА[6], К.С. ХОРЬКОВ[1], Д.А. КОЧУЕВ[1], А.В. АРСЕНИН[3,4], Г.И. ЦЕЛИКОВ[3] , В.С. ВОЛКОВ[3]

[1]Владимирский государственный университет
[2]Московский центр перспективных исследований
[3]Исследовательский центр новых технологий XPANCEO, Дубай, ОАЭ
[4]Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный
[5]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
[6]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ЛАЗЕРНЫЙ СИНТЕЗ КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ НОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ: ЛАБОРАТОРИЯ В ПРОБИРКЕ

Лазерный синтез наночастиц в жидкости уже открыл новую страницу в истории развития методов получения наноматериалов. Продолжением темы становится синтез квантово-размерных наноструктур со сложной топологией, когда в качестве исходных используются сильно анизотропные ван-дер-ваальсовы материалы. В работе сообщается о прогрессе в разработке лазерных и ультразвуковых методов синтеза квантово-размерных фотолюминесцирующих наноструктур из растворов дихалькогенидов переходных металлов.

A.V. PROKHOROV[1,2], A.S. CHERNIKOV[1], A.V. SHESTERIKOV[1,2], M.Yu. GUBIN[1,2], A.V. SYUY[3,4], A.A. POPOV[5], O.A. SHALYGINA[6], K.S. KHORKOV[1], D.A. KOCHUEV[1], A.V. ARSENIN[3,4], G.I. TSELIKOV[3], V.S. VOLKOV[3]

[1]Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs
[2]Moscow Center for Advanced Studies
[3]Emerging Technologies Research Center, XPANCEO, Dubai, United Arab Emirates
[4]Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny
[5]National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
[6]Lomonosov Moscow State University

LASER SYNTHESIS OF QUANTUM-SIZED STRUCTURES FROM NEW OPTICAL MATERIALS: A TEST-TUBE LABORATORY

Laser synthesis of nanoparticles in a liquid has opened a new page in the history of the development of methods for fabrication of nanomaterials. A continuation of the topic

is the synthesis of quantum-sized nanostructures with complex topology, when strongly anisotropic van der Waals materials are used as initial materials. We report the progress in the development of laser and ultrasound methods for the synthesis of quantum-sized photoluminescent nanostructures from solutions of transition metal dichalcogenides.

В работе представлены различные методы синтеза двумерных наноструктур, реализованные посредством ультразвуковой обработки и фемтосекундного лазерного воздействия на растворы дихалькогенидов переходных металлов. В частности, ультразвуковая обработка суспензий WS_2 в N-метилпирролидоне (NMP) способствовала эксфолиации исходной пудры до монослоёв значительной площади (рис. 1а), в то время как лазерное воздействие на раствор WS_2 в ацетонитриле (ACN) приводило к образованию двумерных квантовых точек (рис. 1б). Изменяя тип и время воздействия, были получены различные растворы двумерных структур, позволяющие настраивать длину волны и интенсивность максимума спектра их фотолюминесценции. Для подвергнутых лазерной обработке растворов WS_2 в N-метилпирролидоне наблюдалась яркая фотолюминесценция, видимая невооружённым глазом (рис. 1в). Проведён комплексный анализ полученных растворов, включающий спектроскопию комбинационного рассеяния, просвечивающую электронную микроскопию, картирование с помощью энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Всё это позволило охарактеризовать отдельные двумерные излучатели, провести численное моделирование их спектров фотолюминесценции и сравнить их с экспериментальными. Разработанные подходы могут стать основой общей стратегии получения высокочистых двумерных излучателей с перестраиваемыми спектрами фотолюминесценции. Такие хромофоры имеют перспективы применения в поверхностно-излучающих лазерах, в качестве квантоворазмерных сенсоров для внутриклеточного сканирования в биологических объектах.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 24-12-20015).

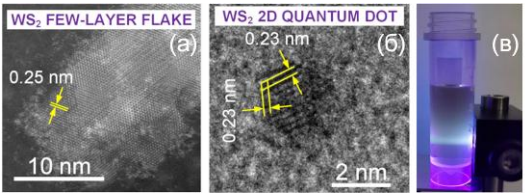


Рис. 1. ПЭМ-изображения: типичного WS_2 монослоя в NMP после 60 мин ультразвукового воздействия (а), WS_2 квантовые точки в ACN после 60 мин обработки лазерными фемтосекундными импульсами (б); фотолюминесценция раствора WS_2 в ACN после лазерной обработки (в)

УДК 535(06)+004(06)

А.В. ШИПУЛИН
Сколковский институт науки и технологий

ФОРМИРОВАНИЕ ЭКОСИСТЕМЫ В ОБЛАСТИ ПРОИЗВОДСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ ФОТОННЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Показано, как Сколтех, реализуя свою уникальную парадигму, преодолевает разрыв между современными фундаментальными достижениями и промышленными приложениями. Мы демонстрируем результаты нашей работы в области применений фотонных интегральных схем для современных оптических коммуникаций, квантовых технологий, оптических систем мониторинга, оптических вычислителей и оптических нейросетей.

A.V. SHIPULIN
Skolkovo Institute of Science and Technology

FORMATION OF AN ECOSYSTEM IN THE FIELD OF PRODUCTION AND APPLICATION OF PHOTONIC INTEGRATED CIRCUITS

The presentation will show how Skoltech, realizing its unique paradigm, bridges the gap between modern fundamental advances and industrial applications. The results of our work in the field of photonic integrated circuits applications for modern optical communications, quantum technologies, optical monitoring systems, optical computing and optical neural networks will be demonstrated.

Рассказывается о проблемах создания в Российской Федерации полного цикла по дизайну, производству, тестированию, корпусировке и применениям фотонных интегральных схем (ФИС) [1] – экосистеме ФИС (ЭКОФИС). ЭКОФИС создаётся на основе кооперации между Лабораторий интегральной фотоники Сколтеха [2], фирмой ФИСТЕХ (стартап Сколтеха), ЗНТЦ, НИЯУ МИФИ и нескольких партнёрских организаций.

В настоящий момент создана полная цепочка от дизайна ФИС до их приложений, готовая к выполнению внешних заказов (рис. 1).

Результатом явилось:

– создан Дизайн-центр для создания цифровых моделей ФИС для любых применений, на любых материальных платформах и в нужных для изготовления форматах;

– установлены рабочие контакты с фабриками – изготовителями ФИС;

– проведены проверочные циклы «дизайн – изготовление – тестирования»;

– проведены (частично) тесты подтвердили заложенные характеристики изделий;

– установлены рабочие контакты с партнёрами, обладающими компетенциями в корпусировке ФИС;

– проведена корпусировка ФИС (частично) в форм-факторах для тестирования и применения в составе конечных изделий;

– проведены переговоры о тестировании ФИС для готовых изделий, а именно: трансиверов (включая системы квантового распределения ключей), интеррогаторов, чиплетов и нейросетей, соответствующие ТЗ либо согласованы, либо находятся в стадии согласования.

– установлены рабочие контакты с партнёрами, занимающимися фундаментальными исследованиями, включая проекты с зарубежными партнёрами.

Запущен проект в рамках НТИ по созданию на борту космических аппаратов Системы бортовой коммуникации и сенсорики – СБКС.



Рис. 1. ЭКОФИС – экосистема фотонных интегральных схем

Список литературы

1. Silicon Photonics and Photonic Integrated Circuits 2024-2034: Market, Technologies, and Forecasts. https://www.idtechex.com/en/research-report/silicon-photonics-and-photonic-integrated-circuits-2024-2034-market-technologies-and-forecasts/1006.

2. Kazakov I., et al. Study of operational algorithm for interrogator with arrayed waveguide grating on a photonic integrated circuit // Photonics. 2024. V. 18 (2).

УДК 535(06)+004(06)

М.И. ТРИБЕЛЬСКИЙ
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

НАНОЧАСТИЦЫ КАК МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СУБВОЛНОВОЙ ОПТИКИ

Резонансное рассеяние света наночастицами дает уникальную возможность концентрировать интенсивное электромагнитное поле в субволновой области пространства, а также управлять его структурой. Несмотря на более чем сто лет обширных исследований, проблема всё ещё далека от завершения. В работе представлен обзор современного состояния дел в этой области в значительной мере основанный на собственных результатах автора.

M.I. TRIBELSKY
Lomonosov Moscow State University

NANOPARTICLES AS MULTIFUNCTIONAL ELEMENTS FOR SUBWAVELENGTH OPTICS

Resonant scattering of light by nanoparticles provides a unique opportunity to concentrate an intense electromagnetic field in the subwavelength region of space, as well as to control its structure. Despite more than a hundred years of extensive research, the problem is still far from complete. The author presents an overview of the current state of the art in this field. The presentation is mainly based on his own results.

В простейших случаях структура поля, возникающая при взаимодействии монохроматического излучения с материальными объектами, имеет два характерных пространственных масштаба – это размер объекта L и длина волны излучения λ. В традиционной оптике в качестве первого обычно выступает размер апертуры, который велик по сравнению с λ. В таком случае λ является *минимальным* характерным масштабом структуры поля. Этим фактором объясняется возникновение дифракционного предела – невозможности сфокусировать электромагнитное поле в пятно существенно меньшее его длины волны. В случае же $L << \lambda$ роль минимального пространственного масштаба поля переходит к L. Это создает предпосылки для возникновения существенно субволновых структур при рассеянии света наночастицами (например, рис. 1 и 2). В работах [1 - 20] приводится подробное обсуждение различных способов и механизмов образования таких структур и управления ими, Помимо академического интереса эти результаты могут служить базой для создания широкого круга новых нанотехнологий.

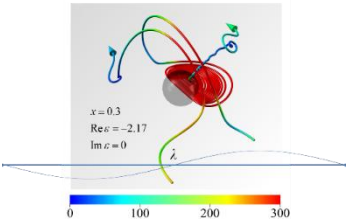


Рис. 1. Две силовые линии поля вектора Пойнтинга при рассеянии плоской линейно поляризованной электромагнитной волны однородной металлической субволновой сферой в вакууме, параметры задачи указаны на рисунке, цветовая гамма соответствует локальному значению интенсивности поля, нормированному на интенсивность падающего излучения, длина волны которого для сравнения указана на рисунке в том же масштабе [6]

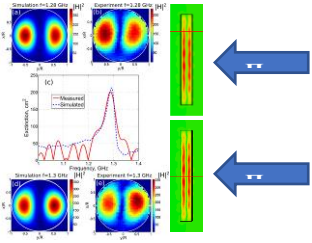


Рис. 2. Гигантская концентрация поля при рассеянии плоской линейно поляризованной электромагнитной волны субволновым цилиндром с большой диэлектрической проницаемостью, направление излучения показано стрелками, на панелях расчётные значения магнитного поля (слева), экспериментально измеренные (справа) [10]

Список литературы

1. Tribelsky M.I., Luk'yanchuk B.S. Field structures and singularities in subwavelength optics (preprint). https://arxiv.org/abs/2410.08166. 2024.
2. Трибельский М.И. // Письма в ЖЭТФ. 2023. Т. 118 (6). С. 417429.
3. Tribelsky M.I. // Laser & Photonics Rev. 2023. V. 18 (3). P. 2300512.
3. Tribelsky M.I., Rubinstein B.Y. // Nanomaterials. 2022. V. 12. P. 3164.
5. Tribelsky M.I., Rubinstein B.Y. // Nanomaterials. 2022. V. 12. P. 1878.
6. Трибельский М.И., Мирошниченко А.Е. // УФН. 2022. Т. 192 (1). С. 45.
7. Brynkin Y.A., Tribelsky M.I. // Physical Review A. 2019. V. 100. P. 013834.
8. Miroshnichenko A.E., Tribelsky M.I. // Phys. Rev. Lett. 2018. V. 120. P. 033902.
9. Трибельский М.И. // Оптический журнал. 2017. Т. 84 (7). С. 4.
10. Kapitanova P., Ternovski V., Miroshnichenko A., et al. // Sci. Rep. 2017. V. 7. P. 731.
11. Tribelsky M.I., Miroshnichenko A.E. // Physical Review A. 2016. V. 93. P. 053837.
12. Tribelsky M.I., Geffrin J.-M., Litman A., et al. // Sci. Rep. 2015. V. 5. P. 12288.
13. Tribelsky M.I. // Europhys. Lett. 2013. V. 104. P. 34002.
14. Luk'yanchuk B.S., Chong T.C., Shi L.P., et al. // In 2008 IEEE Photonics Globale. Singapore, 2008. P. 1.
15. Luk'yanchuk B.S., Tribelsky M.I., Wang Z.B., et al. // Appl. Phys. A. 2007. V. 89. P. 259.
16. Luk'yanchuk B.S., Wang Z.B., Tribelsky M., et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2007. V. 59. P. 234.
17. Luk'yanchuk B.S., Tribelsky M.I., Ternovsky V., et al. // Journal of Optics A. 2007. V. 9. S294.
18. Лукьянчук Б.С., Трибельский М.И., Терновский В.В. // Оптический журнал. 2006. Т. 73. С. 7.
10. Tribelsky M.I., Luk'yanchuk B.S. // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 97. P. 263902.
20. Трибельский М.И. // ЖЭТФ 1984. Т. 59. С. 915.

В.Я. ШУР, А.Р. АХМАТХАНОВ, М.А. ЧУВАКОВА,
Б.И. ЛИСЬИХ, М.С. КОСОБОКОВ, А.А. БОЙКО[1]
Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, Екатеринбург
[1]Новосибирский государственный университет

НЕЛИНЕЙНЫЕ ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ: СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКИ С ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ

Представлены последние достижения в области создания 2D и 3D нелинейных фотонных кристаллов на основе периодически поляризованных сегнетоэлектриков и их использования для генерации второй гармоники и параметрической генерации света. Особое внимание уделено созданию доменных структур и волноводов в объёме сегнетоэлектриков сильно сфокусированным излучением фемтосекундного инфракрасного лазера.

V.YA. SHUR, A.R. AKHMATKHANOV, M.A. CHUVAKOVA,
B.I. LISJIKH, M.S. KOSOBOKOV, A.A. BOYKO[1]
Ural Federal University, Yekaterinburg
[1]Novosibirsk State University, Novosibirsk

NONLINEAR PHOTONIC CRYSTALS: FERROELECTRICS WITH PERIODICAL DOMAIN STRUCTURE

We will present the recent achievements in the creation of the 2D and 3D nonlinear photonic crystals based on periodically poled ferroelectrics for realization of the second harmonic generation and optical parametric oscillation. The main attention will be on the creation of regular domain structures and waveguides in the crystal bulk by focused irradiation of femtosecond near infrared laser.

Нелинейные фотонные кристаллы представляют собой структуры с периодическим изменением нелинейной восприимчивости. Такие структуры, при условии правильно подобранного периода с высокой степенью воспроизводимости, позволяют реализовать с высокой эффективностью нелинейно-оптические преобразования, такие как генерация второй гармоники (ГВГ) и параметрическая генерация света (ПГС). Сегнетоэлектрики являются одними из наиболее перспективных материалов для данного направления, так как в них возможна полная

биполярная модуляция нелинейной восприимчивости за счёт создания регулярной доменной структуры [1].

Основным методом создания регулярных доменных структур в сегнетоэлектриках является приложение электрического поля с помощью системы электродов, созданной методами фотолитографии [2]. Основным недостатком метода является невозможность создания в этом случае трёхмерных доменных структур. В настоящее время активно развивается подход к доменной инженерии, основанный на использовании только импульсного лазерного излучения (light-only switching) для создания доменных структур. В рамках этого подхода может использоваться излучение с длиной волны как в области поглощения, так и в области прозрачности сегнетоэлектрика. В первом случае поглощение импульса лазерного излучения приводит к резкому неоднородному нагреву и последующему охлаждению поверхности образца, что стимулирует возникновение пироэлектрического поля, достаточного для переключения образца [3 - 5]. Однако пространственное распределение пироэлектрического поля в этом случае приводит только к формированию доменов на поверхности с их последующим прорастанием вглубь образца, что не позволяет создавать внутриобъёмные трёхмерные доменные структуры. Эту проблему удалось решить за счёт использования сильно сфокусированного излучения фемтосекундного лазера с длиной волны в области прозрачности материала. В этом случае поглощение излучения и разогрев образца происходят только в области фокуса за счёт мультифотонного поглощения. Первые результаты такого подхода были продемонстрированы в 2015 году в кристаллах ниобата лития [6]. В дальнейших работах продемонстрирована возможность создания 2D и 3D доменных структур в других сегнетоэлектриках [1, 7, 8].

В данной работе рассмотрены современные достижения в области создания 2D и 3D нелинейных фотонных кристаллов как методом переключения полем, так и с помощью импульсного лазерного излучения.

Список литературы

1. Sheng Y., Chen X., Xu T., Liu S., Zhao R., Krolikowski W. // Photonics. 2024. V. 11. P. 447.
2. Shur V.Ya., Akhmatkhanov A.R., Baturin I.S. // Appl. Phys. Rev. 2015. V. 2. P. 040604.
3. Shur V.Ya., Kuznetsov D.K., Mingaliev E.A., et al. // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 99. P. 082901.
4. Shur V.Ya., Mingaliev E.A., Kosobokov M.S., et al. // J. Appl. Phys. 2020. V. 127. P. 094103.
5. Shur V.Ya., Kosobokov M.S., Makaev A.V., et al. // Acta Materialia. 2021. V. 219. P. 117270.
6. Chen X., Karpinski P., Shvedov V., et al. // Appl. Phys. Lett. 2015. V. 107. P. 141102.
7. Lisjikh B., Kosobokov M., Shur V. // Photonics. 2024. V. 11. P. 928.
8. Lisjikh B., Kosobokov M., Turygin A., Efimov A., Shur V. // Photonics. 2023. V. 10. P. 1211.

УДК 535(06)+004(06)

И.Г. ДАДЕНКОВ, А.Л. ТОЛСТИК, Ю.И. МИКСЮК[1],
К.А. САЕЧНИКОВ[1]
Белорусский государственный университет, Минск
[1]Белорусский государственный педагогический университет, Минск

ФАЗОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ В КРИСТАЛЛАХ СИЛЛЕНИТОВ

Приведены оптические схемы и результаты экспериментов по преобразованию фазы световых полей в кристаллах силленитов. Представлена схема записи и восстановления сингулярных пучков с последующим интерференционным определением топологического заряда, а также схемы обращения волнового фронта в условиях записи динамических голограмм и четырёхволнового взаимодействия.

I.G. DADENKOV, A.L. TOLSTIK, Yu.I. MIKSYUK[1],
K.A. SAECHNIKOV[1]
Belarusian State University, Minsk
[1]Belarusian State Pedagogical University, Minsk

PHASE TRANSFORMATION OF LIGHT FIELDS IN SILLENITE CRYSTALS

Optical schemes and results of experiments on phase transformation of light fields in sillenite crystals are presented. The scheme of recording and recovery of singular beams with subsequent interference determination of topological charge, as well as schemes of wavefront reversal under conditions of dynamic hologram recording and four-wave interaction are presented.

Кристаллы семейства силленитов, такие как силикат ($Bi_{12}SiO_{20}$) и титанат висмута ($Bi_{12}TiO_{20}$), относятся к классу фоторефрактивных кристаллов, обладающих свойством изменения показателя преломления под действием света, что позволило записывать динамические решётки с временами релаксации от сотен микросекунд до нескольких секунд и более. По своей структуре силлениты являются широкозонными полупроводниками, имеющими высокую чувствительность к излучению в видимой и ближней ИК-области спектра [1]. Эта особенность позволяет использовать их в устройствах оптической памяти, системах обработки световых полей в реальном времени, системах хранения и передачи информации, при создании управляемых элементов адаптивной оптики, а

также в голографической интерферометрии, включая измерения амплитуд колебаний в субнанометровом диапазоне [2].

Одним из методов фазового преобразования световых полей в кристаллах силленитов является запись сингулярных динамических голограмм [3]. На начальном этапе были записаны объёмные голограммы сингулярных пучков (оптических вихрей) в фотополимере, обладающем высокой лучевой стойкостью. Эти голограммы использовались в качестве оптического транспаранта для формирования импульсных сингулярных пучков. Затем гауссовый опорный пучок и сингулярный сигнальный направлялись на кристалл силиката висмута, где записывалась динамическая голограмма. Для её восстановления использовалось излучение гелий-неонового лазера. В результате формировались прошедший гауссовый и восстановленный сингулярный пучки. Была предложена схема определения топологического заряда с использованием интерференции прошедшего и дифрагированного пучков. При этом стоит отметить компенсацию эффекта оптической активности, присущей кристаллам семейства силленитов, за счёт попутного распространения обоих пучков [4].

Также были экспериментально исследованы схемы фазового преобразования на основе эффекта обращения волнового фронта, позволяющего компенсировать искажения и аберрации, возникающие по мере распространения излучения в оптических схемах. Обращение волнового фронта в кристаллах силленитов было реализовано двумя способами: при помощи голографической записи с последующим восстановлением действительного изображения, а также по классической схеме четырёхволнового взаимодействия. Отличие заключалось в том, что при голографической записи в кристалле предварительно формировалась голограмма искажённого волнового фронта, которая восстанавливалась встречным излучением через некоторое время. В случае четырёхволнового взаимодействия обращение волнового фронта реализовывалось при одновременном падении на кристалл трёх волн, приводящих к возникновению четвёртой обращённой волны.

Список литературы

1. Dadenkov I.G., Tolstik A.L, et al. // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2022. V. 22. P. 1025-1030.

2. Kamshilin A.A., Romashko R.V., et al. // J. Appl. Phys. 2009. V. 105. P. 031101.

3. Tolstik A.L. // Russian Physics Journal. 2016. V. 58. P. 1431-1440.

4. Xie Z., Dadenkov I.G., Melnikova E.A., Tolstik A.L. // Journal of the Belarusian State University. Physics. 2024. V. 3. P. 4-9.

УДК 535(06)+004(06)

П.В. ДОЛГАНОВ, К.Д. БАКЛАНОВА, В.К. ДОЛГАНОВ
Институт физики твёрдого тела им. Ю.А. Осипьяна РАН, Черноголовка

ДВУМЕРНЫЕ ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ НА ОСНОВЕ ХИРАЛЬНЫХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ

В оптических ячейках получены фотонные структуры с двумерным упорядочением на основе хиральных холестерических жидких кристаллов. Обсуждаются уникальные оптические и спектральные характеристики полученных структур и возможности их управляемой перестройки.

P.V. DOLGANOV, K.D. BAKLANOVA, V.K. DOLGANOV
Osipyan Institute of Solid State Physics of the RAS, Chernogolovka

TWO-DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTALS BASED ON CHIRAL LIQUID CRYSTALS

Photonic structures with two-dimensional ordering on the basis of chiral cholesteric liquid crystals have been obtained in optical cells. Unique optical and spectral characteristics of the obtained structures and the possibilities for their controlled transformation are discussed.

Хиральные жидкие кристаллы образуют ряд фотонно-кристаллических структур с нетривиальными оптическими свойствами. Помимо хорошо известной холестерической фазы с одномерной периодичностью, могут быть получены другие структуры с более сложным многоуровневым упорядочением [1 - 3]. В данной работе в плоских оптических ячейках нами получены фотонные жидкокристаллические структуры с квадратным упорядочением в плоскости образца. Использованные жидкие кристаллы представляли собой смеси нехиральных нематических материалов и хиральных добавок. Двумерная структура образуется вблизи температуры перехода холестерического жидкого кристалла в изотропную фазу и сохраняется при охлаждении вплоть до комнатной температуры. Период структуры в плоскости образца более чем на порядок превышает шаг холестерической спирали. Нетривиальный вид структур в отражении и в пропускании (рис. 1) связывается с селективным отражением света на периоде холестерической спирали и с вращением плоскости поляризации света.

Нами изучены оптические и спектральные свойства структур, полученных на основе холестерических жидких кристаллов с периодом

спирали в диапазоне 350 - 850 нм. В спектрах отражения присутствуют полосы, связанные с отражением назад на периоде холестерической спирали и полосы, возникающие из-за последовательных отражений под углом 45 °. Используя для получения двумерной структуры жидкий кристалл с низкотемпературной смектической фазой, мы реализовали перестройку спектрального положения полос в широком диапазоне при изменении температуры. Сопоставлены свойства двумерных структур, получаемых в ячейках с различными граничными условиями для молекул жидкого кристалла на поверхности. Полученные структуры перспективны для создания двумерных дифракционных решёток, в том числе с перестраиваемыми характеристиками.

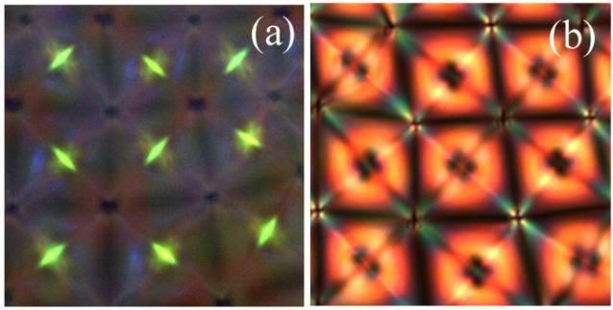


Рис. 1. Вид двумерного фотонного кристалла в отражённом (a) и проходящем (b) свете, поляризаторы скрещены, шаг спирали холестерика около 350 нм

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-12-00200.

Список литературы

1. Dolganov P.V., Baklanova K.D., Dolganov V.K. // Phys. Rev. E. 2022. V. 106. P. 014703.
2. Baklanova K.D., Dolganov P.V., Kats E.I., Dolganov V.K. // JETP Lett. 2023. V. 117. P. 534.
3. Dolganov P.V., Baklanova K.D., Dolganov V.K., Kats E.I. // Pis'ma v ZhETF. 2024. V. 120. P. 808.

УДК 535(06)+004(06)

Е.П. ПАНТЕЛЕЕВА, Е.А. МЕЛЬНИКОВА, Д.В. ГОРБАЧ, А.Л. ТОЛСТИК
Белорусский государственный университет, Минск

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТВИСТ-ПЛАНАРНОГО НЕМАТИЧЕСКОГО ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАЗОВОЙ ТОПОЛОГИИ ОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ

Предложен новый метод анализа фазовой топологии сингулярных пучков с использованием ахроматической нематической твист-планарно микроориентированной жидкокристаллической ячейки, представляющей собой электрически управляемую линзу Френеля. Новый интерференционный метод исключает необходимость в когерентной опорной волне и даёт возможность выполнять прямой анализ фазовой топологии вихря без применения интерферометра. Методика апробирована для импульсного лазерного излучения наносекундной длительности в спектральном диапазоне 532 - 1100 нм и подтверждается теоретическими анализом.

Ye.P. PANTSIALEYEVA, E.A. MELNIKOVA, D.V. GORBACH, A.L. TOLSTIK
Belarusian State University, Minsk

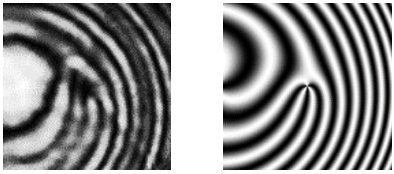
APPLICATION OF A TWIST-PLANAR NEMATIC LIQUID CRYSTAL ELEMENT TO DETERMINE THE PHASE TOPOLOGY OF OPTICAL VORTICES

A new method for analyzing the phase topology of singular beams using an achromatic nematic twist-planar micro-oriented liquid crystal cell representing an electrically controlled Fresnel lens is proposed. The new interference method eliminates the need for a coherent reference wave and makes it possible to perform a direct analysis of the phase topology of the vortex without the use of an interferometer. The technique is tested for pulsed laser radiation of nanosecond duration in the spectral range 532-1100 nm and is supported by theoretical analysis.

В настоящее время оптические вихри (сингулярные фазовые пучки или вортексы) находят широкое применение в различных областях современной фотоники, таких как оптическая связь, захват и манипулирование микрообъектами, запись сингулярных голограмм и других [1, 2]. Вортексы характеризуются наличием на волновом фронте

особых точек (винтовых дислокаций) при обходе вокруг которых в плоскости, перпендикулярной к волновому вектору, фаза световых колебаний изменяется на величину $2\pi\ell$, где ℓ – топологический заряд оптического вихря. В зависимости от направления закручивания спирального волнового фронта топологический заряд оптического вихря ℓ может принимать как положительные, так и отрицательные значения [3]. Исследования, связанные с разработкой методов определения топологического заряда вортексов, являются одной из важнейших прикладных задач фотоники [4].

В работе предложена электрически управляемая линза Френеля, представляющая собой чередующие твист и планарные кольцевые доменные области ориентации директора в слое нематического жидкого кристалла (ЖК). Действие внешнего управляющего напряжения на ЖК-слой позволяет контролировать эффективность фокусировки лазерного излучения в видимом и ближнем ИК-диапазоне спектра, в том числе выключать режим фокусировки ЖК-элемента [5]. Предложен новый интерференционный метод определения величины и знака топологического заряда вортекса, не требующий дополнительной опорной сферической волны. Метод основан на сложении двух когерентных пучков, образованных при дифракции сингулярного фазового пучка на ЖК-линзе Френеля (рис. 1): сходящегося пучка – дифракция оптического вихря на линзе Френеля, распространяющегося в направлении минус первого порядка дифракции и пучка, распространяющегося через линзу без фазовых изменений – нулевой порядок дифракции.



а *б*

Рис. 1. Картина интерференции «ядра» вортекса с топологическим зарядом ℓ = -3, распространяющегося в направлении -1-го дифракционного порядка, с «кольцом» оптического вихря, распространяющегося в направлении 0-го порядка дифракции: экспериментальные (*а*) и теоретические (*б*) результаты

Список литературы

1. Lei T., Zhang M., Li Y., et al. // Light: Science and Appl. 2015. V. 4. P. 257-264.
2. Woerdermann M., Alpmann C., et al. // Laser Photonics Rev. 2013. V. 7. P. 839-854.
3. Ruchi, Senthilkumaran P., et al.// International Journal of Optics. 2020. V. 2020. P. 2812803.
4. Cui S., Xu B., Luo S., et al. // Optics express. 2019. V. 27. P. 12774-12779.
5. Melnikova E.A.., et al. // Journal of Applied Spectroscopy. 2024. V. 91. P. 741-746.

УДК 535(06)+004(06)

В.А. ЖУРАВЛЕВ[1,2], А.А. КОЗЛОВ[1,2], В.А. ДЕМИН[2],
Д.Н. МОСКАЛЕВ[1,2], В.В. КРИШТОП[1,2,3]
[1]*Пермская научно-производственная приборостроительная компания*
[2]*Пермский государственный национальный исследовательский университет*
[3]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АНИЗОТРОПИИ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ТОНКОПЛЁНОЧНОГО НИОБАТА ЛИТИЯ

Приведены результаты исследования анизотропии показателя преломления тонкоплёночного ниобата лития методом призменного ввода излучения. Показано, что величина обыкновенного показателя преломления тонкоплёночного ниобата лития *X*-среза зависит от направления распространения света.

V.A. ZHURAVLEV[1,2], A.A. KOZLOV[1,2], V.A. DEMIN[2],
D.N. MOSKALEV[1,2], V.V. KRISHTOP[1,2,3]
[1]*Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company*
[2]*Perm National Research State University*
[3]*Perm National Research Polytechnic University*

EXPERIMENTAL STUDY OF REFRACTIVE INDEX ANISOTROPY OF THIN-FILM LITHIUM NIOBATE

The results of experimental study of a thin film lithium niobate refractive index anisotropy by the method of prism coupling are presented. It is shown that the ordinary refractive index of a thin film X-cut of the lithium niobate depends on the direction of light propagation.

Тонкоплёночный ниобат лития (НЛ) является одним из перспективных материалов для создания фотонных интегральных схем с высокой плотностью интеграции. Для точного моделирования оптических схем на такой платформе необходимо знать материальные характеристики, такие как обыкновенный no и необыкновенный ne показатели преломления (ПП). Для одноосного кристалла n_e изменяется в зависимости от направления распространения света.

Целью работы является экспериментальное исследование анизотропии ПП тонкоплёночного НЛ *X*-среза (NanoLN, d_{LiNbO3} = 700 нм). ПП измерялся при помощи установки призменного ввода излучения Metricon 2010/M. В плёнку вводилось оптическое излучение длиной волны

1.55 мкм с поляризациями TE и TM для снятия зависимости ПП $n_{TE}(\varphi)$ и $n_{TM}(\varphi)$, соответственно (рис. 1). Полученные значения сравнивались с результатами расчёта ПП из уравнения Френеля для одноосного кристалла (рис. 2).

Показатель преломления n_{TE} изменяется от 2.1396 до 2.2087 в зависимости от угла, что совпадает с изменением n_e в объёмном ниобате лития [1]. При $\varphi = 0$, $n_{TE} = 2.1396 = n_e$. При $\varphi = \pi/2$, $n_{TE} = 2.2087 = n_o$.

В то же время, n_{TM} изменяется от 2.2230 до 2.1952, что нехарактерно для одноосных кристаллов.

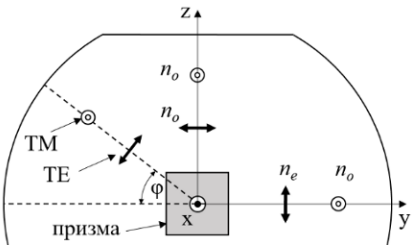


Рис. 1. Схема измерения показателя преломления

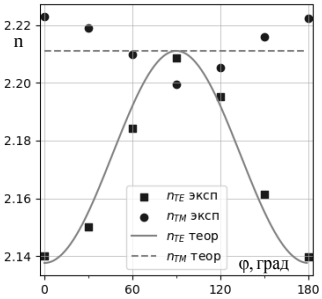


Рис. 2. Результат измерения n_o и $n_e(\varphi)$ ТНЛ

Такая зависимость ПП от угла может быть связана с изменением ПП при ионной имплантации He^+ (ИИ) в технологии изготовления тонкоплёночного НЛ [2]. Ниобат лития *X*-среза имеет выделенное направление в решётке в направлении оси *Z*. Плотность упаковки атомов в направлении *Z* и направлении *Y* различны, соответственно и вероятность возникновения дефекта в этих направлениях при столкновении атома решётки с ионом He^+ различно.

Несмотря на то, что большая часть повреждённой во время ионной имплантации области удаляется химико-механической полировкой, часть слоя с дефектами микроструктуры остается на поверхности [3], что может приводить к изменению ПП [4].

Список литературы

1. Zelmon D. E., Small D.L., Jundt D. // JOSA B. 1997. V. 14 (12). P. 3319.
2. Jia Y., Wang L., Chen F. // Applied Physics Reviews. 2021. V. 8(1). P. 011307.
3. Козлов А.А. Автореферат канд. диссерт. Пермь: Пермск. гос. ун-т, , 2024.
4. Wei D.T.Y., Lee W.W., Bloom LR. // Applied Physics Letters. 1974. V. 25(6). P. 329-331.

Р.И. АНИСИМОВ, А.А. КОЛМАКОВ, Э.В. КОМОВ,
С.М. ШАНДАРОВ
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

ДВУХПУЧКОВОЕ САМОВОЗДЕЙСТВИЕ НА ФОТОРЕФРАКТИВНЫХ ГОЛОГРАММАХ В ДИФФУЗИОННОЙ СТРУКТУРЕ $LiNbO_3$:Cu

Представлены результаты экспериментального исследования особенностей самовоздействия двух световых пучков с длиной волны 532 нм на пропускающих фоторефрактивных голограммах в диффузионно-легированных кристаллах $LiNbO_3$:Cu. Обнаружен эффект перекачки мощности, зависящий от начального контраста интерференционной картины.

R.I. ANISIMOV, A.A. KOLMAKOV, E.V. KOMOV,
S.M. SHANDAROV
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

TWO-BEAM SELF-ACTION ON PHOTOREFRACTIVE HOLOGRAMS IN THE $LiNbO_3$:Cu DIFFUSION STRUCTURE

We present the results of experimental investigation of the features of self-action of two light beams with a wavelength of 532 nm on transmission photorefractive holograms in diffusion-doped $LiNbO_3$:Cu crystals. A power transfer effect depending on the initial contrast of the interference pattern is found.

Диффузионное легирование ниобата лития ионами меди позволяет создавать пластины неполярного среза, которые могут быть использованы для реализации фотовольтаических пинцетов [1]. В настоящем сообщении представлены результаты исследования перераспределения мощности световых пучков, записывающих фоторефрактивные голограмм в пластине $LiNbO_3$:Cu *X*-среза, созданной диффузионным легированием.

Для реализации структур $LiNbO_3$:Cu использовались пластины конгруэнтного ниобата лития *X*-среза, изготовленные в АО «Фомос-Материалы». Легирование кристалла проводилось методом термической диффузии из медных плёнок, нанесённых на обе *X*-плоскости образца, в атмосфере аргона. Наибольшую дифракционную эффективность продемонстрировал образец, полученный диффузией при температуре 700 °C в течение 12 часов. Распределение концентрации ионов меди по координате *x* в этом образце характеризовалось максимальными

значениями вблизи его границ для донорных $C^m_{Cu^+} \approx 2{,}7 \cdot 10^{24}$ м$^{-3}$ и ловушечных $C^m_{Cu^{2+}} \approx 5 \cdot 10^{25}$ м$^{-3}$ центров.

Эффекты самовоздействия двух пучков с обыкновенной поляризацией, приводящие к перераспределению их мощности в процессе записи динамических фоторефрактивных голограмм, наблюдались в пластине $LiNbO_3$:Cu при их симметричном распространении под углами $\pm\theta_B \approx 1{,}33$ угл. град. к оси X таким образом, чтобы вектор решётки был ориентирован вдоль оси Z. Картина интерференции имела пространственный период Λ = 5 мкм, среднюю интенсивность I_0 от 159 до 195 мВт/см^2, а её контраст на входе пластины m_0 задавался изменением мощности сигнального пучка от 0,78 до 4,7 мВт. Регистрация мощности прошедших через образец $LiNbO_3$:Cu с толщиной d = 2,0 мм опорного и сигнального пучков производилось с помощью фотодиодов, подключенных к цифровому осциллографу. На рис. 1 представлены временные зависимости для нормированных на I_0 интенсивностей опорного (*1*) и сигнального (*2*) пучков, для взаимодействия при контрасте интерференционной картины $m_0 \approx 1$ (*а*) и $m_0 \approx 0{,}58$ (*б*).

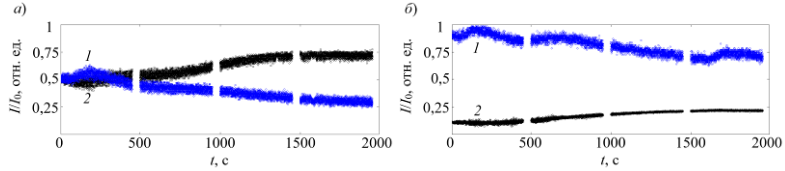


Рис. 1. Временные зависимости интенсивностей взаимодействующих опорного (*1*) и сигнального (*2*) пучков, нормированных на I_0, при контрасте интерференционной картины $m_0 \approx 1$ (*а*) и $m_0 \approx 0{,}58$ (*б*)

Как видно из рис. 1*а*, при начальном контрасте $m_0 \approx 1$ поведение интенсивностей пучков имеет сложный характер. Однако при $m_0 \approx 0{,}58$ (рис. 1*б*) наблюдается монотонный рост интенсивности сигнального пучка, связанный с вкладом диффузионного механизма перераспределения зарядов в процесс формирования фоторефрактивной решётки, дополнительно к фотовольтаическому, характерному для кристаллов $LiNbO_3$:Cu с объёмным легированием.

Работа выполнена в рамках Госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на 2023 - 2025 годы (задание FEWM-2023-0012).

Список литературы

1. Мамбетова К.М. и др. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2019. Т. 62. № 4. С. 89-93.

УДК 535(06)+004(06)

А.И. ГОРДЕЕВА, А.Р. КОРНИЛИЦЫН
Пермский государственный национальный исследовательский университет

УПРАВЛЕНИЕ ПРОТОННЫМ ОБМЕНОМ ТЕРМОГРАВИТАЦИОННОЙ КОНВЕКЦИЕЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПЛАНАРНЫХ ВОЛНОВОДОВ НА КРИСТАЛЛАХ НИОБАТА ЛИТИЯ

В работе экспериментально изучено влияние термогравитационной конвекции на глубину и фазовый состав планарных волноводов, формирующихся на кристаллах ниобата лития в процессе протонного обмена. Рентгеноструктурный анализ и модовая спектроскопия, используемые для диагностики полученных образцов, показали, что характеристики протонного слоя напрямую зависят от интенсивности омывающего кристалл конвективного вихря, который развивается в системе под действием внешнего градиента температуры.

A.I. GORDEEVA, A.R. KORNILICYN
Perm State National Research University

THERMOGRAVITATIONAL CONVECTION TO CONTROL PROTON EXCHANGE MAKING PLANAR WAVEGUIDES ON LITHIUM NIOBATE CRYSTAL

The effect of thermogravitational convection on the depth and phase composition of planar waveguides formed on lithium niobate crystals during proton exchange is experimentally studied. X-ray diffraction analysis and mode spectroscopy used to diagnose the obtained samples showed that the characteristics of the proton layer directly depend on the intensity of the convective vortex washing the crystal, which develops in the system under the influence of an external temperature gradient.

На сегодняшний день широко востребовано использование волноводов на кристаллах ниобата лития при сборке интегрально-оптических фазовых модуляторов. Одним из распространённых методов изготовления волноводов остается протонно-ионный обмен, который стандартно протекает в закрытом реакторе при взаимодействии кристалла с расплавом бензойной кислоты при однородном нагреве системы в течение нескольких часов. При этом над поверхностью кристалла в кислоте образуется тонкий ионный пограничный слой, который замедляет ход протонирования. Омывающее кристалл течение могло бы препятствовать накоплению бензоата лития и одновременно осуществлять поднос

реагента богатого протонами. Такое производство позволит ускорить процесс протонирования, увеличит глубину проникновения протонов и сократит время получения волноводов.

В работе омывающее течение создавалось с помощью конвективного вихря, который беспороговым образом возбуждался в расплаве бензойной кислоты при неоднородном нагреве дна реактора, содержавшего кристаллы ниобата лития *Z*- и *X*-срезов (рис. 1). Контроль температуры и оценка интенсивности термогравитационной конвекции в кислотной среде осуществлялась с помощью регистрирующего устройства термодат, подключённого к линейке термопар, заведённых в исследуемый объём через верхнюю чашу реактора. Исследование фазового состава протонообменных волноводов было проведено методом рентгеноструктурного анализа на рентгеновском двухкристальном дифрактометре ДРОН-УМ1 (рис. 2). Оптические характеристики: показатель преломления и глубина волновода, исследованы с помощью модовой спектроскопии методом призменного ввода.

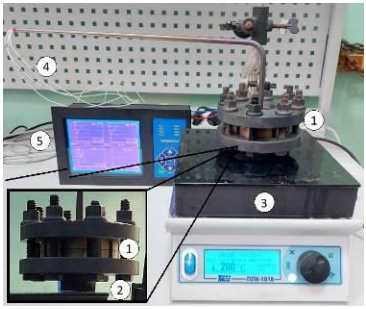


Рис. 1. Фото экспериментальной установки

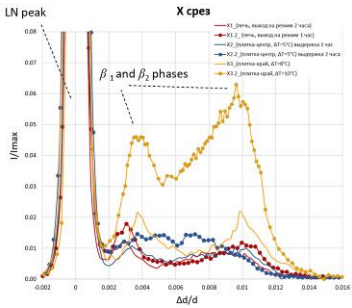


Рис. 2. Результат рентгеноструктурного анализа кристалла *X*-среза

Исследования показали, что с ростом интенсивности конвективного вихря росла глубина протонного слоя. Показатель преломления получаемых волноводов варьировался от 0.113 до 0.120. В результате протонирования на образцах формировались β фазы, которые после отжига при температуре 350 °C в течении пяти часов переходили в стабильную α фазу. Наличие омывающего течения вдвое сокращало время формирования волноводов идентичных эталонным образцам, полученных при обжиге в муфельной печи. В дальнейшем это позволит сократить время технологического цикла при производстве волноводов.

Работа выполнена при поддержке РНФ № 24-29-20277 и Пермского края.

УДК 535(06)+004(06)

А.Д. МОЛЧАНОВА, К.Р. АЛЛАХВЕРДИЕВ[1]
Институт спектроскопии РАН, Троицк
[1]Национальная академия авиации, Баку, Азербайджан

ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В ДВУМЕРНЫХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ $TlGaSe_2$

В данной работе проведена инфракрасная (15 - 300 $см^{-1}$) спектроскопия кристалла $TlGaSe_2$ в широком диапазоне температур (3 - 325 К). В температурных зависимостях параметров мод обнаружены особенности, свидетельствующие о структурных фазовых переходах и об отклике фононной подсистемы на сегнетоэлектрические состояния $TlGaSe_2$. Проведена попытка идентификации структурных и сегнетоэлектрических переходов кристалла в исследуемом диапазоне температур.

A.D. MOLCHANOVA, K.R. ALLAHVERDIEV[1]
[1]*Institute of Spectroscopy of the RAS, Troitsk*
[2]*National Aviation Academy, Baku, Azerbaijan*

PHASE TRANSITIONS IN TWO-DIMENSIONAL FERROELECTRIC CRYSTALS $TlGaSE_2$

In this work, infrared (15 - 300 cm^{-1}) spectroscopy of the $TlGaSe_2$ crystal was performed in a wide temperature range (3 - 325 K). In the temperature dependences of the mode parameters, features are observed that indicate structural phase transitions and the response of the phonon subsystem to the ferroelectric states of $TlGaSe_2$. An attempt to identify the structural and ferroelectric transitions of the crystal in the studied temperature range is presented.

Двумерные сегнетоэлектрические кристаллы $TlGaSe_2$ обладают полупроводниковыми, фотопроводниковыми и фотовольтаическими свойствами, что определяет разнообразные возможности их применения в качестве фототранзисторов, УФ-сенсоров, мемристоров и выпрямителей тока [1 - 3]. Для разнообразных приложений в сегнетоэлектрической памяти, оптоэлектронике и сенсорике важно знание фазовых переходов в кристалле. Фазовый переход при температуре около 100 К в $TlGaSe_2$ впервые был зарегистрирован по спектрам комбинационного рассеяния света [4], затем информация о кристаллическом и сегнетоэлектрическом состояниях уточнялась различными методами, такими как диэлектрические измерения, теплоёмкость, рентгеновская дифракция, ЯМР и другими [5]. При температурах 120 и 107 К происходят два

последовательных структурных фазовых перехода. При T_c = 107 К происходит переход первого рода в сегнетоэлектрическую фазу, сопровождающийся учетверением элементарной ячейки. Ему предшествует переход второго рода при T_i = 120 К. В интервале температур 107 - 120 К реализуется промежуточное несоразмерное состояние с модулированным волновым вектором (δ, δ, 1/4), δ ≈ 0,02 в единицах обратной решётки [6]. Помимо известных переходов при T_i и T_c, в литературе обсуждались фазовые переходы при $T < T_i$ [5]. Однако кристаллическая структура и динамика решётки $TlGaSe_2$ при низких температурах пока что недостаточно изучены. Настоящее исследование направлено на устранение этого пробела и дает детальное исследование температурной зависимости спектров $TlGaSe_2$, что может быть успешно применено для анализа фазовых переходов.

В настоящей работе проведена инфракрасная (15 - 300 $см^{-1}$) спектроскопия кристалла $TlGaSe_2$ в широком диапазоне температур (3 - 325 К). В температурных зависимостях параметров мод наблюдаются особенности, свидетельствующие о структурных фазовых переходах и об отклике фононной подсистемы на сегнетоэлектрические состояния $TlGaSe_2$. Приведена попытка идентификации структурных и сегнетоэлектрических переходов кристалла в исследуемом диапазоне температур.

Работа выполнена в рамках государственных заданий Минобрнауки РФ для ИСАН № FFUU-2024-0004.

Список литературы

1. Seyidov M.Yu. et al. // Phys Scr. 2015. V. 90. P. 015805.
2. Yang S., Wu M., Wang H., et al. // 2D Mater. 2017. V. 4. P. 035021.
3. Seyidov M.Yu. et al. // Semiconductors. 2018. V. 52 P. 2007.
4. Абдулаев Г.В. и др. // Доклады АН Азерб. ССР. 1977. Т. 33 С. 26.
5. Panich A.M. // J Phys: Condens Matter. 2008. V. 20 P. 293202.
6. McMorrow D.F., et al. // J Phys: Condens Matter. 1990. V. 2. P. 3699.

УДК 535(06)+004(06)

Г.С. ПАРАМОНОВ, С.А. СЫЧУГИН, М.И. БАКУНОВ
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

ГЕНЕРАЦИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РАЗДВОЕННЫМ ЛАЗЕРНЫМ ПУЧКОМ

Исследованы особенности генерации черенковского излучения терагерцового диапазона раздвоенным пучком фемтосекундного лазера в кристалле ниобата лития. Обнаружено сильное (в два раза) уширение спектра излучения и увеличение на порядок его амплитуды по сравнению с генерацией излучения гауссовым пучком той же ширины и интенсивности.

G.S. PARAMONOV, S.A. SYCHUGIN, M.I. BAKUNOV
Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

GENERATION OF TERAHERTZ RADIATION BY A SPLIT LASER BEAM

The generation of Cherenkov terahertz radiation by a split femtosecond laser beam in a lithium niobate crystal is investigated. A strong (two times) broadening of the radiation spectrum and an order of magnitude enhancement of the radiation amplitude are found as compared to the generation by a Gaussian beam of the same width and intensity.

Эмиссия черенковского излучения при распространении ультракоротких лазерных импульсов в электрооптических кристаллах – один из распространённых методов генерации терагерцовых волн [1]. Ширина спектра генерируемого при этом излучения зависит как от длительности лазерного импульса, так и от ширины лазерного пучка. Для расширения полосы генерации необходимо острее фокусировать пучок, что упирается в опасность пробоя кристалла. Интересной возможностью является использование в качестве накачки трубчатых лазерных пучков [2, 3], позволяющих устранить интерференционное гашение высокочастотной части спектра излучения из-за отсутствия эмиссии из сердцевины пучка.

В данной работе исследуются особенности генерации черенковского излучения трубчатыми лазерными пучками на двумерной модели. Численные расчёты выполнены для практически интересного случая генерации терагерцового излучения в кристалле ниобата лития ($LiNbO_3$) фемтосекундными импульсами титан-сапфирового лазера с длиной волны

800 нм. Проведено сравнение свойств излучений, генерируемых лазерными пучками с гауссовым $I_g(x) = I_0\exp(-x^2/x_0^2)$ и раздвоенным $I_d(x) = I_0(x/(\alpha x_0))^2\exp(-x^2/(\alpha x_0)^2 + 1)$ профилями интенсивности ($\alpha = 0{,}563$ – коэффициент для выравнивания полуширины x_0 профилей гауссова и раздвоенного пучков на уровне $1/e$). При этом пиковое значение интенсивности I_0 считалось фиксированным.

На рис. 1 представлен результат расчёта моментального снимка электрического поля $E_y(t, x, z)$ для раздвоенного пучка при длительности импульса $\tau_{FWHM} = 150$ фс, поперечном размере по полувысоте $(x_0)_{FWHM} = 50$ мкм ($x_0 \approx 30{,}2$ мкм) и пиковой интенсивности $I_0 = 10$ ГВт/см^2. На рис. 2 построены осциллограммы и спектры терагерцового поля для гауссова (штрихованные кривые) и раздвоенного (сплошные кривые) пучков при тех же значениях параметров. Видно, что амплитуда терагерцового поля в случае раздвоенного пучка на порядок больше, чем в случае гауссова пучка, а спектр излучения примерно вдвое шире вследствие тонкости стенок раздвоенного пучка. Наличие провала в спектре для раздвоенного пучка объясняется деструктивной интерференцией волн от стенок пучка.

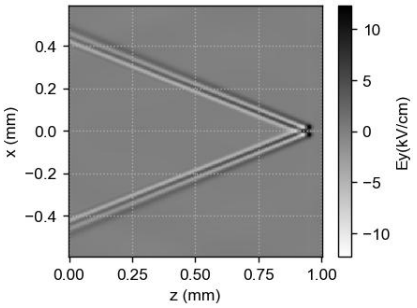


Рис. 1. Моментальный снимок терагерцового поля от раздвоенного пучка

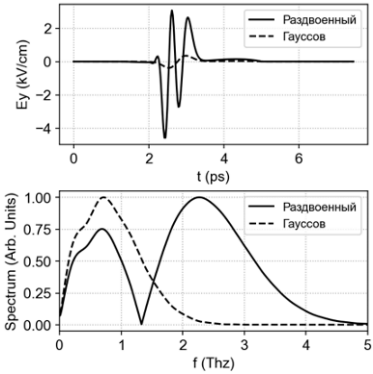


Рис. 2. Осциллограммы и спектры терагерцового поля от раздвоенного и гауссова пучков

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (22-19-00371).

Список литературы

1. Auston D.H., Cheung K.P., et al. // Phys. Rev. Lett. 1984. V. 53. P. 1555.
2. Jian C., Ye Z., Pickel A.D. // J. Appl. Phys. 2022. V. 132. P. 245104.
3. Zukerstein M., Hrabovsky J., Sladek J., et al. // Appl. Surf. Sci. 2022. V. 592. P. 153228.

Л.В. ГАФУРОВА, К.А. ГАЛЮК, А.А. СИРОТКИН,
В.Х. БАГДАСАРОВ, Б.Д. ОВЧАРЕНКО
Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

ГЕНЕРАЦИЯ ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ В КРИСТАЛЛЕ ZnSe: Fe С НАКАЧКОЙ ЦУГОМ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Представлены результаты экспериментов по генерации излучения в среднем ИК спектральном диапазоне в кристалле ZnSe:Fe^{2+}. Впервые реализована схема накачки цугом наносекундных импульсов YLF:Er^{3+} лазера с активной модуляцией добротности на акустооптическом затворе на кристалле KGW. Длительность цуга составляла до 1 мс с частотой следования импульсов до 70 кГц. Рассмотрены различные вне- и внутрирезонаторные схемы накачки ZnSe:Fe^{2+} лазера.

L.V. GAFUROVA, K.A. GALYUK, A.A. SIROTKIN,
V.Kh. BAGDASAROV, B.D. OVCHARENKO
Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

IR RADIATION GENERATION IN ZnSe:Fe CRYSTAL PUMPED BY A NANOSECOND PULSES TRAIN

The experiments result on the mid-infrared spectral range radiation generation in the crystal ZnSe:Fe^{2+} are presented. For the first time a pumping scheme using a ns pulses train from an active Q-switched YLF:Er^{3+} laser with acousto-optic modulator on a KGW crystal are implemented. The train duration is up to 1 ms with a pulse repetition rate up to 70 kHz. Various extra- and intracavity ZnSe:Fe^{2+} pumping scheme are investigated.

Спектральный диапазон 3 - 5 мкм соответствует «окну прозрачности» атмосферы. В данном диапазоне многие молекулы имеют характерные спектры поглощения, что позволяет исследовать свойства различных веществ при взаимодействии с лазерным излучением [1].

Одной из возможных сред для генерации в среднем ИК-диапазоне является селенид цинка ZnSe:Fe^{2+} [2]. Данный кристалл обладает широкой полосой поглощения, прозрачен в среднем ИК, позволяет получать излучение в широком диапазоне длин волн порядка 4 - 6 мкм.

Большинство работ, посвящённых исследованию генерации лазерного излучения с помощью кристаллов халькогенидов, легированных двухвалентными ионами железа, выполняются импульсами свободной генерации [2], одиночными наносекундными импульсами и цугом наносекундных импульсов с пассивной модуляцией добротности [3].

Целью настоящей работы является повышение эффективности генерации лазера на кристалле $ZnSe:Fe^{2+}$ путем накачки цугом наносекундных импульсов. Источником оптической накачки выступает $YLF:Er^{3+}$ лазер с активной акустооптической модуляцией добротности. В резонаторе лазера накачки формируется цуг наносекундных импульсов (рис. 1). Длительность всего цуга ~ 1 мс с частотой следования импульсов до 70 кГц при длительности одного импульса в цуге около 40 нс.

Рассмотрены внерезонаторные и внутрирезонаторные схемы накачки кристаллов $ZnSe:Fe^{2+}$ (рис. 2). Продемонстрирована возможность работы кристалла $ZnSe:Fe^{2+}$ как в качестве пассивного модулятора, так и с одновременной генерацией в среднем ИК спектральном диапазоне.

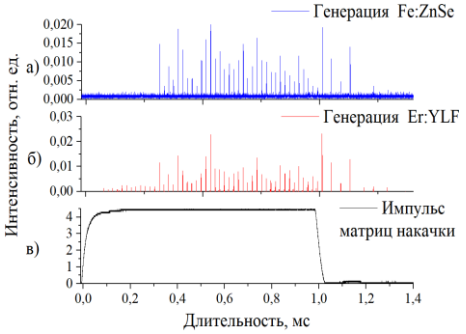


Рис. 1. Осциллограммы импульсов: цуга генерации $ZnSe:Fe^{2+}$ (а) и $YLF:Er^{3+}$ лазеров (б), тока накачки (в)

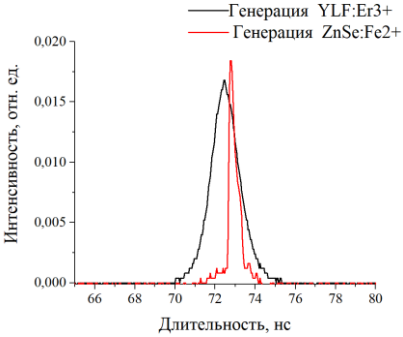


Рис. 2. Осциллограммы одиночных импульсов генерации $YLF:Er^{3+}$ и $ZnSe:Fe^{2+}$ лазеров

Список литературы

1. Ganem J., Bowman S.R., et al. // Nanoscale Research Letters. 2013. V. 8 (1). P. 455- 466.

2. Mirov S.B., Moskalev I.S., et al. // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2018. V. 24 (5). P. 1-29.

3. Великанов С.Д., Гаврищук Е.М. и др. // Квантовая электроника. 2017. Т. 47 (9). С. 831-834.

А.С. РЫЖОВ, Д.П. ЩЕРБИНИН, А.В. РОМАНОВА,
А.В. ИВАНОВ
Университет ИТМО, Санки-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ЛАЗЕРНЫХ КРИСТАЛОВ $YAl_3(BO_3)_4$

В данной работе была исследована термостабилизация кристалла YAB: Yb^{+3}. В ходе экспериментов наблюдалась антистоксовая флуоресценция, интенсивность которой увеличивалась с ростом мощности лазера накачки. Установлены температурные зависимости для лазерных лучей с различными параметрами излучения.

A.S. RYZHOV, D.P. SHCHERBININ, A.V. ROMANOVA,
A.V. IVANOV
ITMO University, Saint-Petersburg

INVESTIGATION OF STABILIZATION MODES OF LASER CRYSTALS $YAl_3(BO_3)_4$

In this work, the thermal stabilization of the YAB:Yb^{+} crystal was investigated. During the experiments, anti-stokes fluorescence was observed, the intensity of which increased with increasing power of the pumping laser. Temperature dependences for laser beams with different radiation parameters have been established.

Кристаллы, легированные ионами Yb, активно используются в наше время для создания высокоэффективных твердотельных лазеров с очень высокой средней мощностью [1]. Это обусловлено простой структурой энергетических уровней иона Yb^{3+}, состоящей всего из двух мультиплетов. Благодаря такому уникальному свойству удается избежать большинства нежелательных эффектов, таких как ап-конверсия, кросс-релаксация или поглощение в возбуждённом состоянии, которые встречаются в материалах, легированных ионами неодима из-за наличия более высоких возбуждённых уровней [2].

Для проведения экспериментов по исследованию термостабилизации кристалла Yb^{3+}:$YAl_3(BO_3)_4$, была собрана оптическая система, в которую входили: одномодовый волоконный лазер (VFLS-1030-B-HP-100-0-COL: SM, Connet, Китай), с длиной волны излучения 1035 нм; кристалл Yb^{3+}:$YAl_3(BO_3)_4$, расположенный на двух вертикально ориентированных стеклянных пластинах, и спектрофотометр R-AERO.

В процессе исследования динамики тепловой нагрузки и возгорания антистоксовой флоуресценции (АСФ) при непрерывной засветке кристалла Yb^{3+}:$YAl_3(BO_3)_4$ лазерным излучением, проводилась регистрация спектров АСФ на протяжении всего времени облучения. Регистрация производилась в течение 180 с при облучении кристалла лазерным излучением мощностью в интервале от 10 до 35 Вт. Данные со спектрофотометра показывают, что кривые лежат в более коротковолновой части спектра, чем длина волны накачки лазера, что соответствует реализации механизма АСФ (рис. 1). С повышением мощности лазерного излучения увеличивается интенсивность люминесценции кристалла; также наблюдался рост коротковолновой полосы люминесценции на длине волны 953 нм и уширение полос спектров люминесценции, что может быть объяснено процессами фотоиндуцированного нагрева кристалла. Для анализа динамики процессов термостабилизации и возгорания антистоксовой флоуресценции была измерена временная зависимость соотношения интенсивностей на длинах волн 953 и 1000 нм. Полученные экспериментальные зависимости представлены на рис. 2. Анализ данных позволил определить температуру термостабилизации и характерное время установления термодинамического равновесия. Было установлено, что с увеличением мощности лазерного излучения растёт температура термостабилизации. Замечено, с ростом мощности излучения установление термодинамического равновесия достигается быстрее.

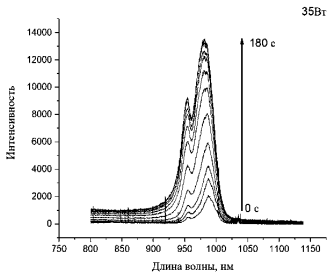


Рис. 1. Спектры антистоксовой флоуресценции кристалла YAB:Yb^{3+}

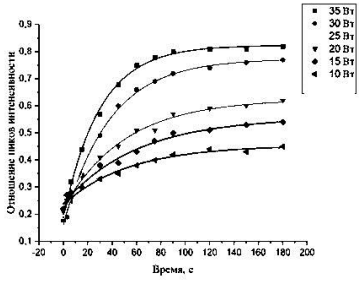


Рис. 2. Временные зависимости соотношения интенсивностей флоуресценции на длинах волн 953 и 1000 нм

Список литературы

1. Krupke W. Ytterbium solid-state lasers – The first decade // IEEE Journal On Sel. Topics in Quant. Elec. 2000. V. 6. P. 1287-1296.

2. Hardman P., Clarkson W., Friel G., Pollnau M., Hanna D. Energy-transfer upconversion and thermal lensing in high-power end-pumped Nd:YLF laser crystals // IEEE J. Quant. Elec. 1999. V. 35. No. 4. P. 647-655.

В.Е. АНИКЕЕВА, Н.Ю. БОЛДЫРЕВ, О.И. СЕМЕНОВА[1],
М.Н. ПОПОВА
Институт спектроскопии РАН, Троицк
[1]*Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск*

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛА ПЕРОВСКИТА $CsPbBr_3$

Проведено комплексное исследование спектров фотолюминесценции (ФЛ) и бесконтактно измеренной фотопроводимости (ФП) монокристалла $CsPbBr_3$ в широком температурном (3,5 - 320 K) диапазоне. Богатая структура в низкотемпературном спектре ФЛ соответствует экситонно-примесным уровням. Найдена энергия связи экситона в $CsPbBr_3$: $E_b = 65 \pm 13$ meV.

V.E. ANIKEEVA, N.Yu. BOLDYREV, O.I. SEMENOVA[1],
M.N. POPOVA
Institute of Spectroscopy of the RAS, Troitsk
[1]*Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of Siserian Branch of the RAS, Novosibirsk*

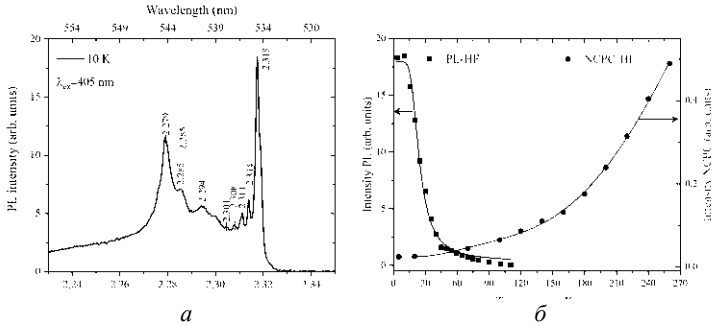
SPECTROSCOPIC STUDY OF A $CsPbBr_3$ PEROVSKITE SINGLE CRYSTAL

A comprehensive study of the photoluminescence (PL) spectra and contactless photoconductivity (PC) of a $CsPbBr_3$ single crystal was carried out in a wide temperature range (3.5 - 320 K). The rich structure in the low-temperature PL spectrum corresponds to exciton-impurity levels. The exciton binding energy in $CsPbBr_3$ was found to be $E_b = 65 \pm 13$ meV.

Гибридные органо-неорганические свинцово-галогенидные перовскиты привлекают внимание из-за широкого спектра применений как перспективные материалы для солнечных элементов [1, 2], лазеров [3], и детекторов рентгеновского излучения [4]. Полностью неорганическое соединение $CsPbBr_3$ выделяется среди остальных представителей галогенидных перовскитов такими характеристиками, как лучшая термическая стабильность и высокий квантовый выход [5]. Несмотря на быстрый прогресс в развитии методов синтеза этого материала и обширную разработку приборов на его основе, остаются вопросы в понимании фундаментальных свойств, определяющих функциональные возможности $CsPbBr_3$.

В работе представлены спектры фотолюминесценции (ФЛ) при возбуждении светом с $\lambda = 405$ нм и бесконтактно измеренной фотопроводимости (ФП) крупного монокристалла $CsPbBr_3$ в широком температурном диапазоне от 3,5 до 320 K. При температуре 10 K в спектре ФЛ были обнаружены широкая полоса с $E_{max} \approx 2{,}24$ эВ, которая может быть ФЛ примесных или дефектных центров, набор узких линий с E = 2,279 - 2,314 эВ, относящихся к экситонно-примесным комплексам, и узкая линия с E = 2,318 эВ, соответствующая люминесценции автолокализованного экситона (рис. 1а). При повышении температуры сигнал ФЛ уменьшался, а ФП увеличивался. Из анализа температурных зависимостей интегральной интенсивности пика, соответствующего экситону, в спектрах ФЛ и ФП (рис. 1б) были определены энергии активации процессов, приводящих к распаду автолокализованного экситона, которые сопровождаются тушением ФЛ и генерацией носителей заряда, а также оценена энергия связи экситона (65 ± 13 мэВ) в монокристалле $CsPbBr_3$.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ для ИСАН № FFUU-2024-0004.



а *б*

Рис. 1. Спектр ФЛ монокристалла $CsPbBr_3$ при 10 K (*а*); температурные зависимости интегральной интенсивности экситонного пика в спектрах ФЛ (квадраты) и ФП (круги) монокристалла $CsPbBr_3$ (б), сплошными линиями представлен результат аппроксимации формулами, обсуждаемыми в работе [*6*]

Список литературы

1. Kojima A., Teshima K., et al. // J. Am. Chem. Soc. 2009. V. 131. P. 6050-6051.
2. Akin S., Arora N., et. al. // Adv. Energy Mater. 2020. V. 10. P. 1903090.
3. Schlaus A.P., Spencer M.S., et al. // Nat. Commun. 2019. V. 10. P. 265.
4. Yakunin S., Sytnyk M., et. al. // Nat. Photonics. 2015. V. 9. P. 444-449.
5. Stoumpos C.C., Malliakas C.D., et. al. // Cryst. Growth Des. 2013. V. 13 (7). P. 2722-2727.
6. Аникеева В.Е. и др. // Оптика и спектроскопия. 2024. Т. 132 (8). С. 793-799.

И.А. ШУКЛОВ
Московский физико-технически институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

СИНТЕЗ КОЛЛОИДНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК С НОВЫМИ РЕАГЕНТАМИ – ПРЕКУРСОРАМИ ХАЛЬКОГЕНОВ

Коллоидные квантовые точки халькогенидов металлов являются обширным классом полупроводниковых наноматериалов с применениями для дисплеев, солнечных батарей, фотосенсорики в ИК-диапазоне. Приведены результаты по использованию новых прекурсоров серы, селена и теллура для получения наночастиц HgZ (Z = S, Se, Te), PbSe и $CuInS_2$. Разработанные реагенты обладают низкой чувствительностью к кислороду воздуха и требованиями к оборудованию.

I.A. SHUKLOV
Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

THE SYNTHESIS OF COLLOIDAL QUANTUM DOTS WITH NEW REAGENTS - CHALCOGENS PRECURSORS

Metal chalcogenides colloidal quantum dots is wide class of semiconductor nanomaterials with applications in displays, solar sells and IR-photosensors. New precursors of sulfur, selenium and tellurium were developed and applied in the preparation of colloidal nanoparticles HgZ (Z = S, Se, Te), PbSe и $CuInS_2$. Novel reagent have good stability to oxidation by air and could be easily handled.

Коллоидные квантовые точки (ККТ) халькогенидов металлов уже нашли свои практические применения в QLED-дисплеях, и имеют потенциал для применения в солнечных батареях и фотосенсорики в ИК-диапазоне. Халькогениды ртути HgZ и свинца PbZ (Z = Se, Te) являясь узкозонными полупроводниками и представляют собой перспективными наноматериалами для среднего и дальнего ИК-диапазонов [1]. Благодаря уникальному сочетанию физических свойств вышеназванные халькогениды обладают высоким потенциалом для применений в фотодетекторах и электролюминесцентных устройствах [2].

Наночастицы тройных халькогенидов индия $MInS_2$(M = Cu, In) являются экологически безопасной альтернативой селениду кадмия в дисплеях и солнечных батареях.

Разработка удобных и воспроизводимых методов получения данных коллоидных наноматериалов для разных диапазонов спектра является необходимым условием для практического применения и создания фотоустройств на их основе. Также особо острой остается проблема доступности многих химических реактивов, которая может быть решена созданием прекурсоров на основе химического сырья, производимого российской промышленностью.

Наночастицы селенидов и теллуридов металлов чаще всего синтезируют используя прекурсоры халькогенов основе триоктилфосфина (ТОФ).[3] В течении последних лет в нашей группе были разработан ряд альтернатив – прекурсоров этих халькогенов.

Для получения коллоидных квантовых точек теллуридов (MTe, M = Hg, Pb, Zn) был разработан прекурсор теллура на основе трициклогексилфосфина. К его достоинствам относится, удобство в использовании и высокая воспроизводимость синтезов наночастиц с этим реагентом, по сравнению с растворами халькогенов в ТОФ. [4]

Для синтеза наночастиц селенидов и сульфидов были разработаны реагенты на основе децена-1, получаемых при растворении халькогенов при повышенном давлении и температуре. Синтез ККТ HgSe и PbSe с поглощением в ИК-диапазоне возможен с использованием реагента на основе децена-1. [5] ККТ $CuInS_2$ и $AgInS_2$ для видимого диапазона были получены с использованием раствора серы в децене-1 в качестве прекурсора.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-03-2024-107 от 17.01.2024 г. (проект № FSMG-2024-0009).

Список литературы

1. Shuklov IA., Razumov V.F. // Russian Chemical Reviews. 2020. V. 89, P. 379.

2. Ponomarenko V.P., Popov V.S., Shuklov I.A., Ivanov V.V., Razumov V.F. Photosensors based on colloidal quantum dots // Russian Chemical Reviews. 2024. V. 93. No. 4. P. 1-52.

3. García de Arquer F.P., Talapin D.V., Klimov V.I., Arakawa Y., Bayer M., Sargent E.H. // Science. 2021. V. 373. eaaz8541.

4. Shuklov I.A., Mardini A.A., Skabitsky I.V., Dubrovina N.V., Perepukhov A.M., Lizunova A.A., Razumov V. F. // Nano-Structures & Nano-Objects. 2023. V. 35. P. 101020.

5. Шуклов И.А., Миленкович Т., Майорова А.В., Вершинина О.В., Иванова В.А., Павлова В.Д., Попов В.С. // Прикладная физика. 2024. Вып. 1. С. 43-50.

УДК 535(06)+004(06)

Е.А. ТАРАСЕВИЧ[1,2,3], Н.А. ЛОЗИНГ[1], М.Г. ГЛАДУШ[1,3]
[1]*Московский педагогический государственный университет*
[2]*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва*
[3]*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

КООПЕРАТИВНАЯ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ДВУХ ПРИМЕСНЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ МОЛЕКУЛ

Исследована фотолюминесценция пары органических молекул в твердотельной матрице при криогенной температуре. Описано формирование коллективных возбуждённых состояний в системе неидентичных излучателей вследствие диполь-дипольного взаимодействия и кинетики радиационной релаксации частиц в поле непрерывного лазерного излучения. Рассчитаны спектральные зависимости фотолюминесценции, иллюстрирующие три кооперативных режима испускания: сверхизлучательный, каскадный и субизлучательный. Показано количественное согласие с результатами экспериментов.

E.A. TARASEVICH[1,2,3], N.A. LOZING[1], M.G. GLADUSH[1,3]
[1]*Moscow Pedagogical State University*
[2]*National Research University Higher School of Economics, Moscow*
[3]*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

COOPERATIVE PHOTOLUMINESCENCE OF TWO IMPURITY ORGANIC MOLECULES

Photoluminescence of two organic molecules in a solid matrix at cryogenic temperature is investigated. We describe the formation of collective excited states in a system of non-identical emitters due to dipole-dipole interaction and the kinetics of the radiative relaxation of the particles driven by a CW laser. Spectral dependences of photoluminescence are calculated to illustrate the cooperative emission modes, i.e., superradiance, cascade emission and subradiance. All calculated spectra are shown to agree quantitatively with the experimental results.

В работе развита квантово-кинетическая теория кооперативной фотолюминесценции двух неидентичных примесных излучателей в формализме матрицы плотности многокомпонентной системы. Получены уравнения для описания состояний излучателей и поля излучения с использованием обобщения метода Боголюбова–Борна–Грина–Кирквуда–Ивона для перехода к редуцированным матрицам плотности и

корреляционным операторам. Рассчитаны спектры возбуждения фотолюминесценции и её статистические характеристики, соответствующие условиям экспериментов в работах [1 - 3]. Показано точное согласие рассчитанных и измеренных зависимостей, как, например, на рис. 1. Предложены новые дополнительные измерения для изучения процессов формирования кооперативных возбуждённых состояний.

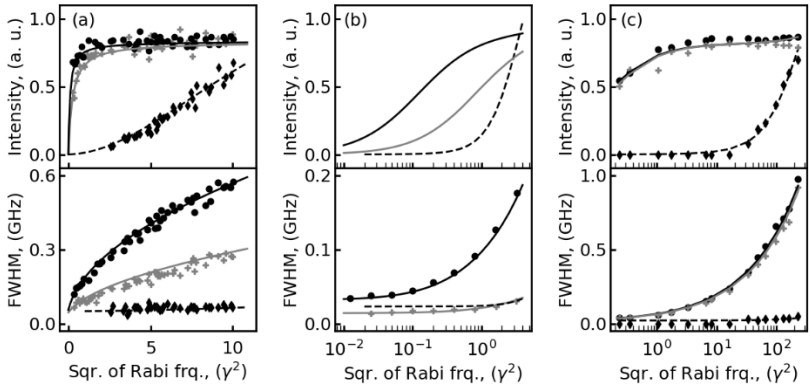


Рис. 1. Рассчитанные (линии) и экспериментальные (точки) мощностные зависимости высот (верхний ряд) и ширин (нижний ряд) линий в спектральном триплете возбуждения кооперативной фотолюминесценции, чёрные линии и круги соответствуют линии сверхизлучения, серые линии и кресты – линии субизлучения, чёрные пунктирные линии и ромбы – линии кооперативного каскадного излучения, мощность лазера выражена через квадрат частоты Раби в единицах скорости радиационной релаксации γ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства просвещения Российской Федерации «Физика наноструктурированных материалов и высокочувствительная сенсорика: синтез, фундаментальные исследования и приложения в фотонике, науках о жизни, квантовых и нанотехнологиях» (тема № 124031100005-5).

Список литературы

1. Hettich C., Schmitt C., Zitzmann et al. // Science. 2002. V. 298 (5592). P. 385-389.
2. Trebbia J.B., Deplano Q., et al. // Nature communications. 2022. V 13 (1). P. 2962.
3. Lange C.M., Daggett E., et al. // Nature Physics. 2024. V. 20. P. 836-842.

УДК 535(06)+004(06)

М.П. БЕЛОВ, А.Ю. ГЛАДКИХ, В.В. ПОПОВ, А.Ю. ФРОЛОВ,
В.В. УТОЧНИКОВА, А.А. ФЕДЯНИН
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

УСИЛЕНИЕ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ЛАНТАНИДНЫХ КОМПЛЕКСОВ С ПОМОЩЬЮ ПЛАЗМОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

Экспериментально изучена фотолюминесценция комплексов европия (Eu), нанесенных на поверхность одномерного плазмонного кристалла, изготовленного из алюминия. Обнаружено двукратное усиление интенсивности фотолюминесценции за счёт повышения оптической плотности состояний, связанной с плазмонной модой, по сравнению с нерезонансным значением фотолюминесценции. Наблюдалась угловая направленность фотолюминесценции в область углов, соответствующих возбуждению поверхностных плазмонов.

M.P. BELOV, A.Yu. GLADKIKH, V.V. POPOV, A.Yu. FROLOV,
V.V. UTOCHNIKOVA, A.A. FEDYANIN
Lomonosov Moscow State University

ENHANCEMENT OF PHOTOLUMINESCENCE OF LANTHANIDE COMPLEXES USING PLASMONIC CRYSTALS

The photoluminescence of europium (Eu) complexes deposited on the surface of a one-dimensional plasmonic crystal made of aluminum has been experimentally studied. A twofold increase in the photoluminescence intensity was found due to an increase in the optical density of states associated with the plasmon mode compared with the nonresonant photoluminescence value. The angular directivity of photoluminescence was observed in the range of angles corresponding to the excitation of surface plasmons.

Фотолюминесценция лантанидных комплексов активно используется при создании светодиодов, биомаркеров и термосенсоров [1]. Для улучшения функциональных возможностей устройств на основе лантанидных комплексов необходимо усиление выхода фотолюминесценции. Одним из перспективных подходов усиления фотолюминесценции квантовых точек и красителей является использование фотонных структур, обладающих оптическими резонансами [2, 3]. К числу таких резонансов относятся поверхностные плазмоны, представляющие собой связанные колебания электронов и

света, распространяющихся на границе раздела металла и диэлектрика [4]. С их помощью возможно повышение плотности оптических состояний, что делает их перспективными для усиления фотолюминесценции.

В данной работе экспериментально изучается спектральная и угловая зависимости фотолюминесценции комплекса европия $Eu(tta)_3(TDZP)$ (tta - теноилтрифторацентилацетонат, TDZP - тиадиазолофенантролин) толщиной 35 нм, нанесенного на поверхность одномерного плазмонного кристалла. Плазмонный кристалл представляет собой периодически структурированную поверхность алюминия с периодом 400 нм. В соответствие с длиной волны испускания европия (612 нм) по условию фазового синхронизма возбуждения поверхностных плазмонов резонанс наблюдается в окрестности угла 22 ° относительно нормали к образцу. Результаты измерений угловых зависимостей спектров фотолюминесценции представлены на рис. 1. Усиление фотолюминесценции при угле около 22 ° связано с повышением плотности оптических состояний из-за наличия поверхностного плазмона. Наблюдается двукратное усиление интенсивности фотолюминесценции по сравнению с нерезонансными углами излучения фотолюминесценции.

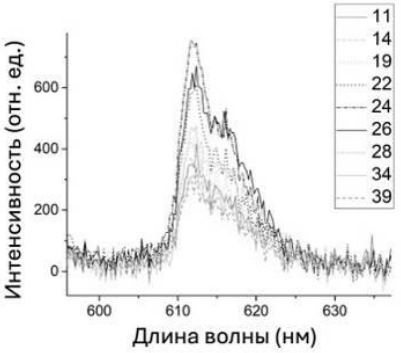


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции в зависимости от угла детектирования

Список литературы

1. Utochnikova V. V. // Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths 2021. V. 59. P. 1-91.

2. Bashiri A., et. al. // ASC Nano. 2023. V. 18. P. 506-514.

3. Sugimoto H., Fujii M. // ACS Photonics. 2021. V. 8. P. 794-1800.

4. Barnes W.L., Dereux A., Ebbesen T.W. // Nature. 2015. V. 424. P. 824-830.

Т. МИЛЕНКОВИЧ, И.А. ШУКЛОВ, К.Т. ХАКИМОВ, В.С. ПОПОВ
Московский физико-технически институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАМЕНЫ ЛИГАНДОВ И ВЛИЯНИЕ НА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ СЛОЁВ КОЛЛОИДНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК СЕЛЕНИДА РТУТИ

Квантовые точки (ККТ) селенида ртути (HgSe) обладают уникальными свойствами, что делает их перспективными для оптоэлектроники и фотодетекторов. В работе исследована скорость замещения лигандов (I и SCN) в тонких плёнках HgSe, нанесённых методом спин-коатинга, и его влияние на фотоэлектрические свойства. Кинетика замещения изучалась с использованием ИК-фурье-спектроскопии. Фоторезисторные структуры были созданы нанесением ККТ с послойной заменой лигандов на золотые встречно-штыревые электроды и определены их электрофизические характеристики и их фотоэлектрические характеристики, оценивавшиеся по вольт-амперным характеристикам при различных режимах засветки.

T. MILENKOVICH, I.A. SHUKLOV, K.T. KHAKIMOV, V.S. POPOV
Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

STUDY OF THE LIGAND EXCHANGE AND ITS EFFECT ON THE PHOTOELECTRIC PROPERTIES OF THIN FILMS OF MERCURY SELENIDE COLLOIDAL QUANTUM DOTS

Mercury selenide (HgSe) quantum dots (CQDs) possess unique properties, making them promising materials for optoelectronics and photodetectors. This study investigates the ligand exchange process (I and SCN) in thin HgSe films, fabricated using the spin-coating method, and its impact on photoelectric properties. The kinetics of the ligand exchange were studied using FTIR spectroscopy. Photoresistors were created by applying CQDs with layer-by-layer ligand exchange onto gold interdigitated electrodes, and their photoelectric characteristics were evaluated through current-voltage (I-V) measurements under different illumination conditions.

Квантовые точки (ККТ) халькогенидов ртути являются перспективными наноматериалами для оптоэлектроники, сенсоров и фотодетекторов благодаря их узкой запрещённой зоне, квантоворазмерному эффекту и высокой подвижности носителей заряда. Эти свойства делают ККТ идеальными кандидатами для использования в

ИК-фотодетекторах, транзисторах и системах энергоэффективной электроники. Однако стабилизация свойств поверхности плёнок ККТ и управление их электрофизическими характеристиками остаются актуальной задачей, требующей понимания взаимодействий лиганд – полупроводниковое ядро. Лиганды – координирующие молекулы, образующие органический монослой на поверхности коллоидной квантовой точки. Одним из важных этапов является замена исходных лигандов на более компактные, что позволяет улучшить электронную проводимость и стабилизировать свойства материала.

В нашей работе мы исследовали процесс замещения лигандов в тонких слоях ККТ селенида ртути (HgSe) и его влияние на фотоэлектрические свойства материалов. Для этого на подложку методом спин-коатинг наносились тонкие плёнки ККТ HgSe, которые затем обрабатывались растворами лигандов йода (с помощью тетрабутиламмоний йодида, TBAI) и тиоцианата (SCN^-). Для изучения динамики замещения лигандов в зависимости от времени обработки проводился анализ спектров поглощения с использованием ИК-фурье-спектроскопии (FTIR). Полученные данные показали, что процесс замещения лигандов имеет временную зависимость, что проявляется в изменении интенсивности характерных полос поглощения.

Для оценки фотоэлектрических свойств, плёнки ККТ создавались на золотых встречно-штыревых электродах, и были измерены их вольт-амперные характеристики (ВАХ) при различных режимах засветки (980 нм, АЧТ).

Таким образом, проведённое исследование подтверждает, что замещение лигандов является ключевым этапом для оптимизации свойств в тонких плёнках ККТ. Дальнейшее изучение механизмов замены и влияние различных лигандов позволит создать более эффективные материалы для устройств преобразования энергии.

Список литературы

1. Ponomarenko V.P., et al. // Russ. Chem. Rev. 2024. V. 93. RCR5113.
2. Lhullier E., et. al. // Chem. Rev. 2021. V. 121 (7). P. 3627-3700.
3. Keuleyan S., et. al. // ASC Nano. 2014. V. 8 (8). P. 8676-8682.
4. Chen M., et al. // ASC Nano. 2017. V. 11 (6). P. 6514-5622.
5. Boles M., et al. // Nature Mater. 2016. V. 15. P. 141-153.
6. Shuklov I.A., Razumov V.F. // Russ. Chem. Rev. 2020. V. 89 (3). P. 379-391.

УДК 535(06)+004(06)

Д.В. КОНОНОВ, Л.Н. БОРОДИНА, А.В. КОЧАКОВ,
А.В. ПАЛЕХОВА, Н.Б. ЛЕОНОВ, Н.А. ФИЛАТОВ[1],
А.С. БУКАТИН[1], Д.Р. ДАДАДЖАНОВ, Т.А. ВАРТАНЯН
Университет ИТМО, Санки-Петербург
[1]Академический университет им. Ж.И. Алферова, Санкт-Петербург

УСИЛЕНИЕ ХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ЛЮМИНОЛА В ПРИСУТСТВИИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ ВНУТРИ МИКРОФЛЮИДНОГО ЧИПА

Исследована хемилюминесценция люминола при окислении гипохлоритом натрия в присутствии гранулированной серебряной плёнки внутри микрофлюидного чипа. Обнаружено увеличение интенсивности хемилюминесценции и снижения порога детектирования гипохлорита натрия в присутствии серебряных наночастиц, обладающих плазмонным резонансом в полосе хемилюминесценции люминола.

D.V. KONONOV, L.N. BORODINA, A.V. KOCHAKOV,
A.V. PALEKHOVA, N.B. LEONOV, N.A. FILATOV[1],
A.S. BUKATIN[1], D.R. DADADZHANOV, T.A. VARTANYAN
ITMO University, Saint-Petersburg
[1]Alferov University, Saint-Petersburg

LUMINOL CHEMILUMINESCENCE ENHANCEMENT IN THE PRESENCE OF A METAL COATING INSIDE A MICROFLUIDIC CHIP

The results of experiments on luminol chemiluminescence signal enhancement in the presence of a silver coating inside a microfluidic chip are presented. The values of chemiluminescence enhancement depending on the concentration of sodium hypochlorite and the minimum detectable concentrations for different microfluidic chips were determined.

Хемилюминесцентные сенсоры активно используются для детектирования различных процессов внутри живых организмов. По результатам хемилюминесцентного анализа можно судить о протекании воспалительных процессов, клеточном дыхании и других физиологических процессах [1, 2]. В результате реакции окисления хемилюминофор переходит в возбуждённое состояние и испускает свет [1]. Аналитом могут выступать как сами активные формы кислорода, так и

различные катализаторы, которые способствуют образованию активных форм кислорода, в том числе ионы металлов [2, 3]. Поскольку интенсивность хемилюминесценции невелика, были предложены разнообразные методы её увеличения, как физические, так и химические [2]. Один из перспективных физических методов заключается в помещении излучающих молекул хемилюминофора вблизи металлических наночастиц, обладающих плазмонным резонансом [2]. Использование микрофлюидных чипов (рис. 1) обеспечивает более полное перемешивание реагентов в ограниченном объёме, что позволяет максимально полно собрать излученный свет [3]. Целью данной работой является установление минимально детектируемой концентрации гипохлорита натрия в ходе хемилюминесцентной реакции с люминолом внутри микрофлюидного чипа с серебряным покрытием.

В ходе эксперимента водный раствор люминола с концентрацией 3×10^{-4} М смешивался внутри микрофлюидного чипа со смесью NaOH и NaOCl. Концентрация гипохлорита натрия изменялась, а кислотность раствора удерживалась на уровне pH = 7. Для регистрации интенсивности хемилюминесценции использовался счётчик фотонов H11890 (Hamamatsu) в режиме счёта фотонов. Интенсивность хемилюминесценции люминола растёт с ростом концентрации NaOCl. Когда хемилюминесцентная реакция проводилась в чипе с наночастицами, наблюдалось уменьшение минимально детектируемой концентрации NaOCl с 400 до 300 мкМ. Рост интенсивности хемилюминесценции при использовании чипа с наночастицами составил от 10 до 100 % (рис. 2).

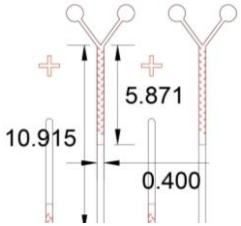


Рис. 1. Геометрия канала микрофлюидного чипа

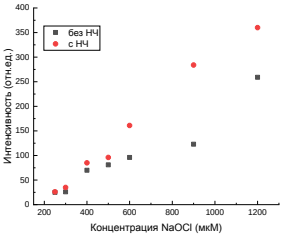


Рис. 2. Усиление хемилюминесценции люминола в зависимости от концентрации NaOCl

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 23-72-00045.

Список литературы

1. Ромодин Л.А. // Acta Naturae (русскоязычная версия). 2021. V. 13 (3). P. 90-100.
2. Vladimirov Y.A., Proskurnina E.V. // Biochemistry (Moscow). 2009. V. 74 (13). P. 1545-1566.
3. Al Lawati H.A.J. // Luminescence. 2013. V. 28 (5. P. 618-627.

УДК 535(06)+004(06)

Т.В. КОРОЛЕВА, К.Т. ХАКИМОВ, Т. МИЛЕНКОВИЧ,
И.А. ШУКЛОВ, В.С. ПОПОВ
Московский физико-технически институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

СИНТЕЗ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК ТЕЛЛУРИДА РТУТИ С ДОРАЩИВАНИЕМ ДЛЯ MWIR ДИАПАЗОНА

В данной работе были получены квантовые точки теллурида ртути с помощью метода горячей инжекции с последующим доращиванием. Для полученных структур исследованы оптические и фотосенсорные свойства.

T.V. KOROLEVA, K.T. KHAKIMOV, T. MILENKOVICH,
I.A. SHUKLOV, V.S. POPOV
Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

SYNTHESIS OF MERCURY TELLURIDE QUANTUM DOTS WITH ADDITIONAL GROWTH FOR MWIR BAND

In this work, mercury telluride quantum dots were obtained using the hot injection method with subsequent growth. The optical and photosensory properties of the resulting structures were studied.

Квантовые точки (КТ) халькогенидов ртути, в том числе HgTe, демонстрируют широкий диапазон настраиваемости размеров их запрещённых зон. КТ HgTe обладает контролируемым межзонным поглощением, которое можно настраивать от диапазона NIR до LWIR с помощью регулировки размера частиц, зависящим от температуры и времени синтеза [1]. Одним из наиболее распространённых методов синтеза КТ HgTe является метод горячей инжекции. В типичном синтезе в органическом растворителе смешивают прекурсоры ртути и теллура. Реакцию проводят при относительно высоких температурах в диапазоне 60 - 100 °C в зависимости от требуемого размера [2].

В данной работе были получены КТ HgTe для MWIR диапазона с центром поглощения около 3,5 мкм. Для достижения требуемого размера КТ HgTe получали методом горячей инжекции с последующим доращиванием. Вначале прекурсоры ртути и теллура смешивали при 90 °C. Реакцию выдерживали в течение часа, после чего снова добавляли прекурсор теллура для доращивания кристаллов

HgTe до необходимого размера. Реакцию останавливали через час охлаждением на ледяной бане. Полученные КТ HgTe демонстрировали пик поглощения около 3.5 мкм (рис. 1). КТ HgTe полученные за один час реакции без доращивания имели пик поглощения около 2.6 мкм.

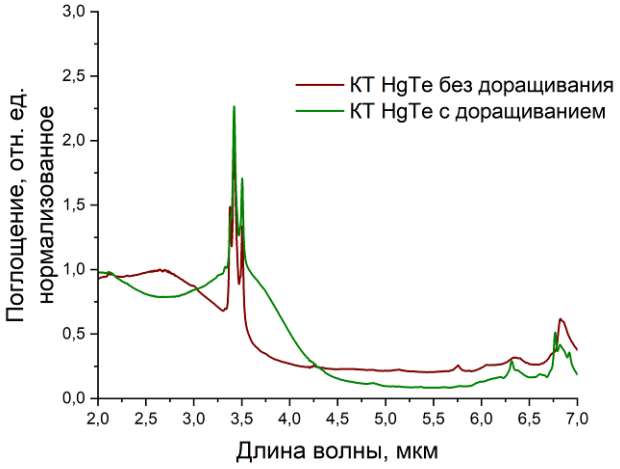


Рис. 1. Спектры поглощения квантовых точек HgTe

Для полученных КТ HgTe были изучены фотосенсорные свойства. Для этого КТ были нанесены на кремниевую подложку. Для замены длинных алкильных лигандов на короткие и проводящие был использован метод внутриплёночного обмена. КТ обрабатывались с использованием раствором 1,2-этандитиола и HCl. Кислота использовалась для повышения стабильности устройства с помощью ионов Cl^-, служащими для пассивации атомов Hg.

Таким образом, доращивание оболочки в процессе синтеза позволяет получить КТ, поглощающие в диапазоне MWIR. Фотосенсоры на полученных КТ могут быть использованы при создании приборов ночного видения.

Список литературы

1. Tian Y., et al. // Nanoscale. 2023. V. 15 (14). P. 6476-6504.

2. Lhuillier E., Keuleyan S., Guyot-Sionnest P. // Nanotechnology. 2012. V. 23 (17). P. 175705.

УДК 535(06)+004(06)

Д.А. МУРАТОВ, Н.Э. НИКОЛАЕВ, Т.К. ЧЕХЛОВА
Российский университет дружбы народов, Москва

СРАВНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТНЫХ СРЕД, СОДЕРЖАЩИХ СМЕСЬ МЕДНЫХ И ЗОЛОТЫХ НАНОЧАСТИЦ

Проведено исследование спектральных свойств композитных сред с медными и золотыми наночастицами, и сред, содержащих смесь медных и золотых наночастиц. Получены спектры отражения, пропускания и поглощения данных структур при разных углах падения излучения. Проведено сравнение спектральных свойств композитных сред, содержащих смесь медных и золотых наночастиц в объёмных отношениях, равных 1 : 2, 1 : 1 и 2 : 1. Проведён сравнительный анализ полученных результатов.

D.A. MURATOV, N.E. NIKOLAEV, T.K. CHEKHOVA
Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow

COMPARISON OF OPTICAL PROPERTIES OF COMPOSITE MEDIA CONTAINING A MIXTURE OF COPPER AND GOLD NANOPARTICLES

A study of the spectral properties of composite media with copper and gold nanoparticles and media containing a mixture of copper and gold nanoparticles was carried out. The reflection, transmission, and absorption spectra of these structures obtained at different radiation incidence angles. The spectral properties of composite media containing a mixture of copper and gold nanoparticles in volume ratios 1 : 2, 1 : 1 and 2 : 1 are compared. A comparative analysis of the results obtained is carried out.

Сейчас большое внимание уделяется исследованию композитных сред с наночастицами. Такие среды обладают особыми свойствами и могут быть использованы при создании нелинейных оптических устройств, устройств записи и передачи оптической информации [1]. Для практического применения этих сред необходимо исследовать влияние на их спектральные характеристики формы и материала наночастиц.

Проведено исследование оптических свойств композитных сред с медными и золотыми наночастицами сферической формы. Были рассмотрены композитные среды, содержащие одновременно оба вида наночастиц. Был проведён расчёт спектральных характеристик таких сред при разных объёмных отношениях медных и золотых наночастиц. При

анализе свойств композитной среды использовалась модель эффективной среды Максвелла–Гарнетта [1].

В работе получены выражения для коэффициентов отражения и пропускания композитных сред, содержащих наночастицы из меди, золота и смесь из медных и золотых наночастиц с объёмными отношениями золота и меди – 1 : 2, 1 : 1, 2 : 1. Расчёты спектров проводились для случая, когда общая концентрация частиц в композите составляла 1 %.

Проведены расчёты спектров отражения, пропускания и поглощения композитной плёнки с медными, золотыми наночастицами и их смеси (рис. 1) при разных углах падения излучения.

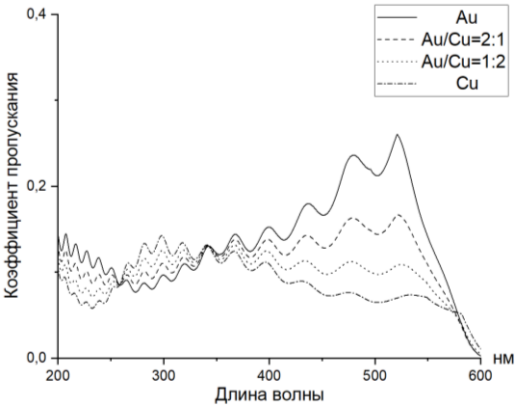


Рис. 1. Спектры пропускания композитных сред, содержащих смесь медных и золотых частиц сферической формы с разными объёмными отношениями

Установлено, что при использовании смеси наночастиц с объёмным отношением 1 : 1 спектральная характеристика коэффициента пропускания лежит в промежутке между соответствующими кривыми пропускания для композитных сред, содержащих только золотые или медные наночастицы. При увеличении количества одного из видов частиц по отношению к другому спектры пропускания смещаются в сторону спектров поглощения для композитов с соответствующими наночастицами. Полученные результаты позволяют учесть влияние материалов наночастиц на спектральные характеристики композитной среды и прогнозировать параметры среды для практического применения.

Список литературы

1. Головань Л.А., Тимошенко В.Ю., Кашкаров П.К. Оптические свойства композитов на основе пористых систем // Успехи физических наук. 2007. Т. 177. № 6. С. 619-638.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. КОЧАКОВ, К.А. МИТУСОВА[1], Д.В. КОНОНОВ,
Д.Р. ДАДАДЖАНОВ
Университет ИТМО, Санки-Петербург
[1]Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И.П. Павлова

СПЕКТРОСКОПИЯ АБЛЯЦИОННЫХ ЗОЛОТЫХ НАНОЧАСТИЦ В МАКРОФАГАХ ЛЕЙКЕМИИ

В работе были синтезированы золотые плазмонные наночастицы методом лазерной абляции. Полученные наночастицы были инкубированы с опухолевыми клетками линии лейкемии (THP-1). Было установлено, что на спектрах экстинкции суспензии клеток с наночастицами максимум плазмонного резонанса сдвинут в длинноволновую область на 100 нм и уширен, что говорит об агрегации наночастиц внутри клеток.

A.V. KOCHAKOV, K.A. MITUSOVA[1], D.V. KONONOV,
D.R. DADADZHANOV
ITMO University, Saint-Petersburg
[1]Pavlov First Saint-Petersburg State Medical University

SPECTROSCOPY OF ABLATIVE GOLD NANOPARTICLES IN LEUKEMIA MACROPHAGES

Gold plasmonic nanoparticles were synthesized by laser ablation. The obtained nanoparticles were incubated with tumor cells of leukemia line (THP-1). It was found that on the extinction spectra of cell suspension with nanoparticles the plasmon resonance maximum was shifted to the long-wave region by 100 nm and broadened, which indicates the aggregation of nanoparticles inside the cells.

Эффективность инкубации наночастиц в клетки, является важным вектором развития внутриклеточного транспорта. Поэтому в данной работе были использованы золотые наночастицы, особенность которых заключается в явлении локального поверхностного плазмонного резонанса, что выражается максимумом в видимой области на спектре поглощения. С другой стороны, изменение показателя преломления окружающей среды влияет на плазмонные свойства в металлических наночастицах, что приводит к сдвигу максимума плазмонного резонанса в длинноволновую область на спектре поглощения [1]. С точки зрения оптики, эндоцитоз может быть зафиксирован с помощью смешения

максимума плазмонного резонанса на спектре поглощения, так как показатель преломления питательной среды 1.33, а цитоплазмы клетки примерно 1.4.

Синтез золотых наночастиц осуществлялся методом лазерной абляции (рис. 1) [2]. Для данных наночастиц были получены спектры поглощения в водном растворе. Наночастицы были инкубированы с клеточной линией макрофагов лейкемии линии THP-1. В качестве питательной среды использовался раствор RPMI. В инкубаторе, при температуре 37 °C и 5 % CO_2, клетки выдерживались несколько временных этапов: 8 и 24 ч, затем фиксировались в буферном растворе. Для мониторинга эндоцитоза золотых наночастиц были зарегистрированы спектры экстинкции суспензии клеток с наночастицами. Было установлено, что спектр экстинкции наночастиц в клетках значительно уширен на 30 нм и смещён в красноволновую область на 100 нм, как показано на рис. 2. На основании полученных спектров можно сделать вывод, что наночастицы агрегируют внутри клеток.

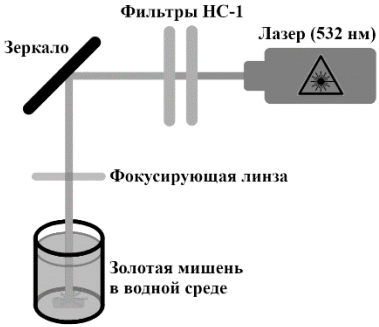


Рис. 1. Метод лазерной абляции

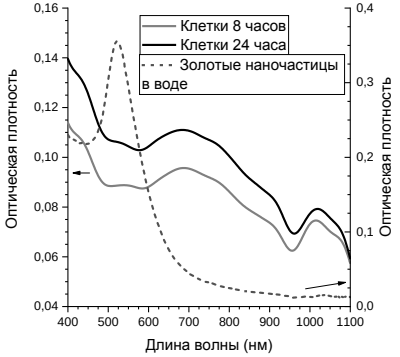


Рис. 2. Спектры поглощения клеточных растворов и наночастиц

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 22-72-10057.

Список литературы

1. Kelly K.L., Coronado E., Zhao L.L., Schatz G.C. // The Journal of Physical Chemistry. 2003. V. 107 (3). P. 668-677.

2. Torrisi L., Torrisi A. Laser ablation parameters influencing gold nanoparticle synthesis in water // Radiation Effects and Defects in Solids, 2018. V. 173. No. 9-10. P. 729-739.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. СЮЙ[1,2], И.А. ЗАВИДОВСКИЙ[1], Д.И. ЦЕЛИКОВ[1,3],
И.В. МАРТЫНОВ[1], Н.В. СИДОРОВ[4], М.Н. ПАЛАТНИКОВ[4],
А.В. АРСЕНИН[1,2], В.С. ВОЛКОВ[2]

[1]Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный
[2]Исследовательский центр новых технологий XPANCEO, Дубай, ОАЭ
[3]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
[4]Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева Кольского научного центра РАН, Апатиты, Мурманская обл.

СИНТЕЗ АМОРФНЫХ НАНОЧАСТИЦ НИОБАТА ЛИТИЯ

В данной работе с помощью метода лазерной фрагментации в жидкости были синтезированы аморфные наночастицы ниобата лития размером 30 - 100 нм, обладающие фотокаталитическими свойствами.

A.V. SYUY[1,2], I.A. ZAVIDOVSKY[1], D.I. TSELIKOV[1,3],
I.V. MARTYNOV[1], N.V. SIDOROV[4], M.N. PALATNIKOV[4],
A.V. ARSENIN[1,2], V.S. VOLKOV[2]

[1]Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny
[2]Emerging Technologies Research Center XPANCEO, Dubai, United Arab Emirates
[3]National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
[4]I.V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Material of Kola Science Center of the RAS, Apatity, Murmansk region

SYNTHESIS OF AMORPHOUS LITHIUM NIOBATE NANOPARTICLES

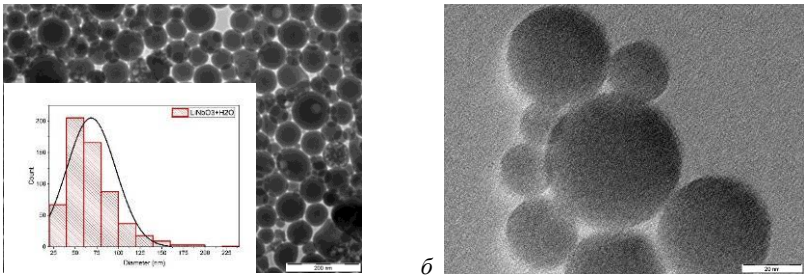
In this work, amorphous lithium niobate nanoparticles of 30 - 100 nm in size with photocatalytic properties were synthesized using the method of laser fragmentation in liquid.

Наночастицы ниобата лития, как и другие наноматериалы, обладают улучшенными физическими и химическими свойствами по сравнению с их макроскопическими аналогами. Они обладают большей поверхностной активностью и имеют более лёгкую миграцию и диффузию в различных средах. Эти свойства делают наночастицы ниобата лития идеальным материалом для использования в различных областях науки и техники.

Целью работы является получение аморфных наночастц ниобата лития с фотокаталитическими свойствами методом лазерной фрагментации в

жидкости. На рис. 1 показаны изображения синтезированных наночастиц ниобата лития в дистиллированной воде, полученные с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Наночастицы ниобата лития синтезированы методом лазерной фрагментации в жидкости. Схема синтеза строилась следующим образом: в качестве источника использовался Yb:KGW-лазер (1030 нм, 250 фс, 25 мкДж, 200 кГц, модель ТЭТА-20, Авеста, Россия), с помощью зеркал лазерное излучение направлялось на гальваносканер (LScan-10, Атеко-ТМ, Россия), необходимый для равномерного распределения лазерного излучения по мишени. В данной работе в качестве мишени используется стеклянная кювета (БК-7, толщина стенок 3 мм), которая была заполнена 20 мл дистиллированной воды и порошком ниобата лития в количестве 5 мг. Лазерный луч фокусируется линзой F-Theta (фокусное расстояние 100 мм, Thorlabs, США) на толщину раствора на расстоянии 1 см от края стенки. Синтез продолжают в течение 20 мин., после чего невзаимодействующие частицы порошка удаляют в центрифуге (Centrifuge 5425 R, Eppendorf, Германия) 3000 g, 1 мин, и из надосадочной жидкости получают готовые наночастицы требуемого распределения по размерам.

Показано, что в структуре аморфных наночастицах $LiNbO_3$ существуют кислородные октаэдры O_6 с расположенными в них ионами Li^+ и Nb^{5+}. Таким образом, наночастицы сохраняют в какой-то степени структуру (и соответственно) свойства обычного кристаллического сегнетоэлектрика $LiNbO_3$. Этот факт может позволить получать новые материалы путём внедрения аморфных наночастиц в различные матрицы. Однако структура полученных аморфных наночастиц существенно разупорядочена по сравнению со структурой кристаллических порошков. В частности, возможно (вследствие разупорядочения структуры) приобретение структурой наночастиц центра симметрии.



а *б*

Рис. 1. ПЭМ-изображение наночастиц ниобата лития, синтезированных в дистиллированной воде: после лазерной фрагментации с распределением по размеру (*а*), аморфные наночастицы ниобата лития (*б*)

УДК 535(06)+004(06)

Э.А. ИЗБАСАРОВА, А.Р. ГАЗИЗОВ, М.С. ПУДОВКИН
Казанский (Приволжский) федеральный университет

БИОСЕНСОР НА ОСНОВЕ КОЛЛОИДНЫХ НАНОЧАСТИЦ $CeYTbF_3$, СВЯЗАННЫХ С ПЛАЗМОННЫМИ ЛИГАНДАМИ

В работе рассматривается обнаружение молекул в растворе с помощью люминесцентных наночастиц. Плазмонные наночастицы изменяют их свечение из-за эффектов Парселла и Фёрстера, последний ведёт к тушению люминесценции. Моделирование этих эффектов в коллоидном растворе позволяет определить условия усиления и тушения, что открывает путь к увеличению чувствительности сенсоров, основанных на люминесценции.

E.A. IZBASAROVA, A.R. GAZIZOV, M.S. PUDOVKIN
Kazan (Volga Region) Federal University

BIOSENSOR BASED ON $CeYTbF_3$ COLLOIDAL NANOPARTICLES BOUND TO PLASMONIC LIGANDS

The interaction of luminescent nanoparticles with plasmonic nanoparticles changes their luminescence, which is associated with the appearance of Förster and Purcell effects. To enhance luminescence, it is important to reduce the effect of the Foerster effect. The finite difference method in the time domain made it possible to determine the conditions for the predominance of the Purcell effect and to develop a technique for analyzing the amplification of transitions, which increases the sensitivity of sensors based on fluorescent nanoparticles.

В последние десятилетия наблюдается интенсивное развитие методов исследования, направленных на обнаружение молекул в низких концентрациях [1]. Одним из многообещающих материалов для детектирования аналитов стали люминесцентные наночастицы (ЛНЧ), легированные редкоземельными элементами. Они обладают уникальными способностями, такими как испускание фотонов с преобразованием частоты и термочувствительность [2 - 4]. Кроме того, отсутствие фотовыжигания и мерцания люминесценции придают этим наночастицам особые свойства, которые делают их идеальными кандидатами для создания сенсоров и биологических анализаторов [5 - 7]. Плазмонные наночастицы, находящиеся вблизи ЛНЧ, могут изменить их свечение через согласование частоты локализованного поверхностного плазмонного резонанса (ЛППР) металлической наноструктуры с частотой возбуждения

ЛНЧ. Это способствует увеличению интенсивности возбуждающего излучения благодаря локализации поля вблизи металлической наноструктуры, что может способствовать увеличению чувствительности сенсора.

В представленной работе рассматривается обнаружение молекул в растворе с использованием ЛНЧ. Особое внимание уделяется воздействию плазмонных наночастиц на люминесцентные свойства ЛНЧ, которое обусловлено конкурирующими механизмами — эффектом Фёрстера и эффектом Парселла. Эти эффекты оказывают значительное влияние на люминесцентные свойства наночастиц, в частности, эффект Фёрстера может приводить к тушению люминесценции, что негативно сказывается на чувствительности сенсоров.

Для повышения чувствительности сенсоров, основанных на люминесценции, необходимо разобраться в условиях, при которых каждый из этих эффектов доминирует. В ходе работы был использован метод конечных разностей во временной области (FDTD), который позволил определить спектр условий, способствующих преобладанию эффекта Парселла в коллоидном растворе. Моделирование привело к выявлению параметров системы, например таких как расстояние между наночастицами и их конфигурации, которые влияют на соотношение вкладов этих двух эффектов.

Также разработана методика анализа как радиационных, так и нерадиационных переходов, что значительно расширяет перспективы повышения чувствительности сенсоров, построенных на основе коллоидных растворов ЛНЧ. Данная методика позволяет не только количественно оценивать степень усиления люминесценции, но и выявлять конструкции сенсоров с оптимальными характеристиками для достижения максимальной чувствительности анализа.

Данная работа финансировалась за счёт субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету по государственному заданию в сфере научной деятельности (FZSM-2022-0021).

Список литературы

1. Cohen L., Cui N., Cai Y., et al. // ACS Nano. 2020. V. 14. No. 8. P. 9491-9501.
2. Qin X., Xu J., Wu Y., Liu X. // ACS Cent. Sci. 2019. V. 5. P. 29-42.
3. Chen G., Ohulchanskyy T.Y., Liu S., et al. // ACS Nano. 2012. V. 6. No. 4. P. 2969-2977.
4. Shah S.J., Li W., Tang Y., et al. // Appl. Catal. B. 2022. V. 315. P. 121555.
5. Жарков Д.К., Шмелев А.Г., Леонтьев А.В. и др. // Известия РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 12. С. 1746-1750.
6. Mendez-Gonzalez D., Lopez-Cabarcos E., Rubio-Retama J., Laurenti M. // Adv. Colloid Interface Sci. 2017. V. 249. P. 66-87.
7. Yang B., Chen H., Zheng Z., Li G. // J. Lumin. 2020. V. 223. P. 117226.

УДК 535(06)+004(06)

С.Р. РОЗЕНТАЛЬ, Д.А. КИСЛОВ, А.С. ШАЛИН
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

ОПТИЧЕСКИЙ ЛУЧ ПРИТЯЖЕНИЯ ДЛЯ СУПЕРРАССЕИВАЮЩИХ НАНОЧАСТИЦ

В работе было показано, что в системе из двух скрещённых плоских волн, падающих на цилиндрическую наночастицу, возможно получение оптической силы, направленной против распространения излучения. Такой эффект называется «лучом притяжения» [1, 2] и может быть получен за счёт эффекта суперрассеяния [3] и максимизации рассеяния вперёд частицы. Были найдены условия возникновения силы притяжения для суперрассеивающей частицы и проведено сравнение с частицей в обычном режиме рассеяния.

S.R. ROZENTAL, D.A. KISLOV, A.S. SHALIN
Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

OPTICAL TRACTOR BEAM FOR SUPERSCATTERING NANOPARTICLES

In this work it was shown that in a system of two crossed plane waves incident on a cylindrical nanoparticle, it is possible to obtain an optical force directed against the propagation of radiation. Such an effect is called a ‘tractor beam’ [1, 2] and can be obtained due to the effect of super-scattering [3] and maximizing the forward scattering of the particle. The conditions for the occurrence of the pulling force for a super-scattering particle were obtained and compared with a particle exhibiting normal scattering behaviour.

Для получения силы, направленной против импульса падающего излучения, необходимо максимизировать рассеянное вперед поле, чтобы импульс отдачи превысил импульс, передаваемый излучением [4]. Для этого были рассмотрены две скрещённые плоские волны, падающие на суперрассеивающую частицу (рис. 1), у которой сечение рассеяния отдельных мультипольных компонент превышает фундаментальный предел и при этом есть выраженный максимум рассеяния вперёд (рис. 2).

Целью работы является исследование зависимости оптической силы, действующей на суперрассеивающую частицу, от угла между падающими плоскими волнами.

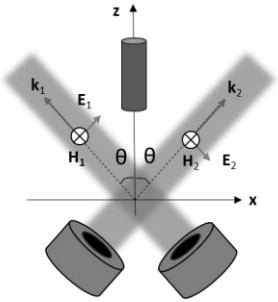


Рис. 1. Моделируемая система: цилиндрическая наночастица, облучаемая двумя скрещёнными ТМ поляризованными плоскими волнами

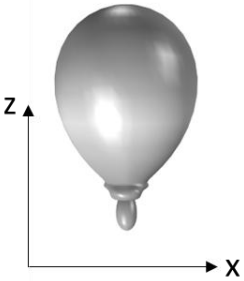


Рис. 2. Дальнее рассеянное поле при угле θ = 0° (одна плоская волна)

Варьируя угол θ между лучами в случае различных поляризаций, мы получили условия смены отталкивания вдоль оси z на притяжение (рис. 3). Для ТМ-поляризации притяжение достигается при углах $40° \le \theta \le 54°$, а для ТЕ-поляризации – при $40° \le \theta \le 52°$ и $74° \le \theta \le 90°$. Сравнивая с цилиндром другого размера, не обладающим свойством суперрассеяния, можно заметить, что у него сила притяжения (рис. 4) достигается только при $\theta \ge 76°$, при этом величина силы очень мала.

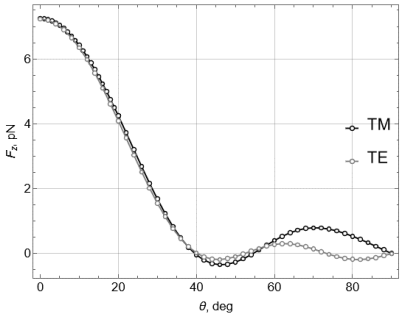


Рис. 3. Сравнение силы Fz, действующей на суперрассеивающую частицу, при ТМ- и ТЕ-поляризациях

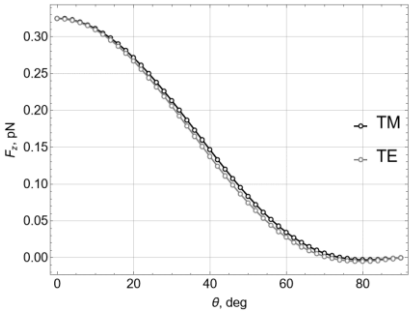


Рис. 4. Сравнение силы Fz, действующей на частицу с обычным рассеянием, при ТМ- и ТЕ-поляризациях

Список литературы

1. Ding W., et al. // Advanced Photonics. 2019. V. 1 (2). P. 1-14.
2. Brzobohatý O. et al. // Nat. Photonics. 2013. V. 7 (2). P. 123-127.
3. Canós Valero A., et al. // Nat. Commun. Springer US, 2023. V. 14 (1). P. 1-13.
4. Chen J., et al. // Nat. Photonics. 2011. V. 5 (9). P. 531-534.

УДК 535(06)+004(06)

Е.В. СОБОЛЕВА, С.С. РУДЫЙ, Д.П. ЩЕРБИНИН, А.В. ИВАНОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ БИСТАБИЛЬНОЙ ДИНАМИКИ МИКРО- И НАНОЧАСТИЦ В ГИБРИДНОЙ ИОННОЙ ЛОВУШКЕ

Рассматривается бистабильная динамика заряженных микро- и наночастиц в гибридной ионной ловушке, которая может быть рассмотрена как платформа для реализации машины Изинга. Представлен теоретический анализ бифуркационного потенциала ловушки и исследование поведения частиц в ней. Полученные результаты позволяют предложить схему вычислений, ориентированную на поиск глобального минимума гамильтониана Изинга, где бинарные спины представлены положением частиц в устойчивых состояниях ловушки.

E.V. SOBOLEVA, S.S. RUDYI, D.P. SHCHERBININ, A.V. IVANOV
ITMO University, Saint-Petersburg

BISTABLE DYNAMICS OF MICRO- AND NANOPARTICLES IN A HYBRID ION TRAP

The bistable dynamics of charged micro- and nanoparticles in a hybrid ion trap is investigated, which can be considered as a platform for implementing an Ising machine. A theoretical analysis of the bifurcation potential of the trap and an investigation of particle behavior within it are presented. The obtained results enable the proposal of a computational scheme aimed at finding the global minimum of the Ising Hamiltonian, where binary spins are represented by the positions of particles in stable states of the trap.

Для создания квантовых вычислителей, способных решать сложные оптимизационные задачи, существуют различные платформы, реализующие нелинейные динамические системы с атомами и ионами, кристаллами, квантовыми точками, сверхпроводниками и другие [1]. Важную роль в создании платформ для оптимизационных задач играет бистабильность состояний нелинейной динамической системы, управляемая с помощью внешнего параметра [2, 3]. Изменение управляющего параметра позволяет переводить динамическую систему из состояния с одной стабильной точкой равновесия в состояние с двумя такими точками. Наличие бистабильной динамики в системе открывает

возможность использование такой системы в качестве физической реализации машины Изинга [4].

В работе [5] для создания платформы, реализующей машину Изинга, предложена гибридная ловушка [6], использующая одновременно лазерное излучение и радиочастотное поле для удержания и манипулирования заряженными микро- и наночастицами (рис. 1). Настоящая работа посвящена теоретическому описанию эффективного бифуркационного потенциала такой платформы и исследованию динамики заряженной микрочастицы в гибридной ловушке. Результатом работы является модель вычислительной схемы поиска глобального минимума гамильтониана Изинга, основанная на аналогово-цифровом представлении бинарных спинов, кодируемых положениями микрочастицы в точках стабильности гибридной ловушки (рис. 2).

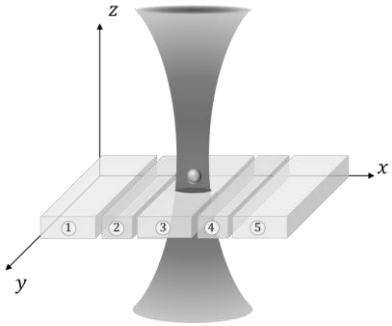


Рис. 1. Схема гибридной ловушки

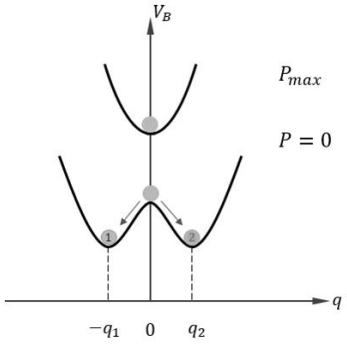


Рис. 2. Образование бистабильного потенциала в зависимости от мощности лазерного излучения

Список литературы

1. Reifenstein S., Leleu T., McKenna T., et al. // Adv. Opt. Photon. 2023. V. 15. P. 385-441.
2. Böhm F., Vaerenbergh T., Verschaffelt G., et al. // Commun Phys. 2021. V. 4. P. 149.
3. Leleu T., Utsunomiya U., Aihara K. // Phys. Rev. 1995. P. 022118.
4. Böhm F., Verschaffelt G., Van der Sande G. // Nat. Commun. 2019. V. 10. P. 3538.
5. Soboleva E., et al. // JETP. 2024. V. 4 (10). P. 527-534.
6. Colin D., Chiaverini J., McConnell R., et al. // Appl. Phys. Rev. 2019. V. 6 (2). P. 021314.

В.С. МАКИН, Р.С. МАКИН[1]
Институт ядерной энергетики СПбПУ, Сосновый Бор, Ленинградская обл.
[1]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

СВЯЗАННЫЕ ОРТОГОНАЛЬНЫЕ РЕШЁТКИ В КЕРРОВСКОМ ВОЛНОВОДЕ, ИНДУЦИРОВАННОМ УКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СРЕДНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА

Предложена модель образования связанных нанорешёток ортогональной ориентации, основанная на образовании под действием ультракороткоимпульсного лазерного излучения (УКИ ЛИ) полевого волновода в полупроводнике и интерференции с участием возбуждаемых в нем волноводных мод. Модель хорошо подтверждается экспериментами по формированию поляризационно-зависимых решёточных структур УКИ ЛИ среднего ИК-диапазона на кремнии.

V.S. MAKIN, R.S. MAKIN[1]
Institute for Nuclear Energetic SPbPU, Sosnovy Bor, Leningrad Region
[1]National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

COUPLED ORTHOGONAL GRATINGS IN KERR WAVEGUIDE INDUCED BY MIDDLE-IR ULTRASHORT LASER RADIATION

The model for the formation of coupled orthogonal gratings in semiconductors by ultrashort laser radiation based on the formation of field waveguide and gratings due to waveguide modes participation in the interference processes has been suggested. The model is in good agreement with experimental data on the creation of polarization-dependent gratings on silicon by ultrashort middle-IR laser radiation.

Считается, что возбуждение волноводных мод (ВМ) в экспериментах по взаимодействию ультракороткоимульсного (УКИ) лазерного излучения (ЛИ) с прозрачными конденсированными средами не реализуется, поскольку термический волновод ($dn / dT > 0$) [1] образуется уже после окончания импульса ЛИ. Здесь n – показатель преломления среды. Однако возможно образование полевого (керровского) волновода за счёт нелинейных свойств среды. Проанализируем опубликованные экспериментальные данные по образованию ортогональных первичных $\mathbf{g}_w \perp \mathbf{E}$ и вторичных $\mathbf{G} \,||\, \mathbf{E}$ решёток под действием УКИ ЛИ среднего ИК-диапазона на c-Si [2, 3], взяв за основу работу [2] (λ = 3,6 мкм, τ = 200 фс, ν = 500 Гц) на основе универсальной поляритонной модели (УПМ) [4]. Здесь **E** – вектор напряжённости электрического поля ЛИ.

Суммируем основные экспериментальные факты, относящиеся к образованию решёток $\mathbf{g}_w \perp \mathbf{G}$. 1. Наличие резкого порога (по плотности энергии ЛИ Q) образования структур $\mathbf{g}_w$ – свидетельствует о пороговой интенсивности процесса образования нелинейного волновода [5]. 2. Большой разброс периодов структур $\mathbf{g}_w$ $\Delta d \approx \lambda\Delta n/n^2$ характерен для ВМ, поскольку $1/(n+\Delta n) \le d/\lambda \le 1/n$ [1], что подтверждается фурье-преобразованием области образования структур [3]. Здесь λ – длина волны ЛИ. 3. При нормальном падении ЛИ и формировании решёток $\mathbf{g}_w$ с $d \sim \lambda/n$ ($\sim \lambda/2n$) пятно вытягивается в направлении распространения ВМ-вектора **E**, в 1,4 раза. 4. Ориентации $\mathbf{g}_w \perp \mathbf{E}$ и периоды $d \sim \lambda/n$ свидетельствуют о возбуждении ВМ ТЕ-типа, обладающих более низкими потерями по сравнению с ТМ-модами. 5. С ростом числа импульсов наблюдалось образование решёток с периодами $d_1 \sim \lambda/n \approx 1{,}4$ мкм, $d_2 \sim \lambda/2n \approx 0{,}77$ мкм, $d_3 \sim \lambda/4n \approx 0{,}37$ мкм, $d_4 \sim \lambda/8n \approx 0{,}185$ мкм, интерпретированных нами как связанные с интерференцией с участием пространственных гармоник ВМ, периоды которых подчиняются последовательности нелинейной универсальности Фейгенбаума [4]. Отметим квантовый характер приведённой последовательности экспериментально обнаруженных и идентифицированных решёточных структур. 6. При повышенных значениях Q наблюдалось образование ортогональных решёток **G** с периодом $D = 2\lambda/n \approx 2{,}24$ мкм, которые мы связываем с взаимной интерференцией ВМ [6]. Это объясняет ортогональную ориентацию решёток **G** по отношению к решёткам $\mathbf{g}_w$. Отношение периодов решёток $D/d \approx 2$. Оценка нелинейного показателя преломления (n_2) для $\lambda = 4$ мкм, выполненная по экспериментальному разбросу периодов $\Delta d \approx 0{,}48$ мкм, $n_2 \approx 6{,}5\cdot10^{-14}$ см^2/Вт, показала удовлетворительное согласие с теоретической оценкой ($n_2 \approx 3.3\cdot10^{-14}$ см^2/Вт).

Приведённые экспериментальные данные и их интерпретация подтверждают предложенную нами полевую волноводную модель образования системы взаимодействующих ортогональных решёточных структур на кремнии под действием УКИ ЛИ среднего ИК-диапазона.

Список литературы

1. Makin V.S., et al. // Optical Memory and Neural Network Modeling. 2012. No. 1. P. 52-61.
2. Werner K., Chowdhury E. // Nanomaterials. 2021. V. 11. P. 1192.
3. Kudryashov S.I., Pflug T., Busleev N.I., et al. // Opt. Mater. Express. 2021. V. 11. P. 1.
4. Макин В.С. Макин Р.С., Воробьев А.Я. и др. // В сб. Нелинейность в современном естествознании /под ред. Г.Г. Малинецкого., М.: Изд-во ЛКИ, 2009. С. 302-322.
5. Макин В.С., Пестов Ю.И., Макин Р.С. // Оптика и спектроскопия. 2017. Т. 123. С. 94-98.
6. Макин В.С., Макин Р.С. // XIII международная конференции по фотонике и информационной оптике: сбор. научн. тр. М.: НИЯУ МИФИ, 2024. С. 375-376.

Е.Р. БУРМИСТРОВ[1,2,3], Л.П. АВАКЯНЦ[1]
[1]*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*
[2] *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*
[3]*Московский государственный строительный университет*

ЭФФЕКТИВНАЯ МАССА ОСНОВНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В СВЕТОДИОДНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ InGaN/GaN С РЕШЕТЧАТЫМ ЗАТВОРОМ ПО ДАННЫМ THz–TDS

Гетероструктуры со множественными квантовыми ямами $In_xGa_{1-x}N/GaN$ используются в режиме плазмонного детектирования терагерцевого излучения. Генерация двумерных плазмонов проводится методом терагерцовой спектроскопии с временны́м разрешением (THz–TDS). Источником излучения служит Ti-сапфировый лазер с длительностью импульсов 130 фс. В качестве структуры, связывающей электрическое поле плазмона с полем терагерцевого излучения, используется решетчатый затвор с Ti/Au контактами, выращенный методом электронно-лучевой литографии на поверхности гетероструктуры.

E.R. BURMISTROV[1,2,3], L.P. AVAKYANTS[2]
[1]*Lomonosov Moscow State University*
[2]*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*
[3]*Moscow State University of Civil Engineering*

THE EFFECTIVE MASS OF THE MAIN CHARGE CARRIERS IN InGaN/GaN LED'S HETEROSTRUCTURES WITH A GRATING COUPLER ACCORDING TO THz–TDS DATA

Heterostructures with $In_xGa_{1-x}N/GaN$ multiple quantum wells are used for plasmon detection of terahertz radiation. Two-dimensional plasmons are generated by time-domain terahertz spectroscopy (THz–TDS). The radiation source is a Ti-sapphire laser with a pulse duration of 130 fs. A grating coupler with Ti/Au electrodes grown by electron beam lithography on the surface of the heterostructure is used as a structure connecting the electric field of the two-dimensional plasmon with field of THz radiation.

В последнее время в полупроводниковых гетероструктурах активно изучается плазмонное детектирование терагерцевого излучения (~ 10^{12} Гц) [1, 2]. Поскольку длина волны двумерного плазмона на три порядка меньше, чем длина волны терагерцевого излучения (ТГц), необходима структура, связывающая электрическое поле терагерцевого излучения с электрическим полем двумерного плазмона. В качестве такой структуры в последнее время активно используются решётчатые затворы [3]. Выращенные на поверхности гетероструктур такие затворы усиливают

локализованные плазмонные осцилляции, связанные с коллективным движением основных носителей заряда в множественных квантовых ямах.

Целью данной работы является определение методом терагерцевой спектроскопии с временным разрешением (THz-TDS) времени релаксации квазиимпульса, подвижности и эффективной массы основных носителей заряда в гетероструктурах InGaN/AlGaN/GaN со множественными квантовыми ямами. Для этих гетероструктур на подложке Al_2O_3 наращивался затравочный слой GaN толщиной 5 мкм. и формировалась буферная сглаживающая сверхрешётка InGaN/GaN. Активная область гетероструктур состоит из трёх квантовых ям $In_xGa_{1-x}N/GaN$. Следующим формировался слой AlGaN. В качестве структуры, связывающей электрическое поле плазмона с электрическим полем ТГц-излучения, использовался решётчатый затвор, состоящий из Ni/Au контактов с периодом 500 нм, выращенный на поверхности гетероструктуры AlGaN/GaN. Источником излучения является титан-сапфировый лазер на длине волны 800 нм со средней выходной мощностью излучения 57 мВт и с частотой следования импульсов равной 60 МГц. Для генерации и детектирования ТГц-излучения использовались две фотопроводящие антенны из низкотемпературного GaN. Одна из них применялась в качестве детектора ТГц-импульсов, другая – для преобразования подаваемых на неё фемтосекундных лазерных импульсов в ТГц электромагнитные волны. Генерация и детектирование 2D плазмонных осцилляций осуществлялась методом THz–TDS. Временные формы ТГц-импульсов были получены в геометрии на прохождение. При этом электрическое поле плазмона локализуется под металлическими полосами решётчатого затвора, а плазмон возбуждается в режиме «сильной связи».

Быстрое преобразование Фурье временных форм позволило получить частотные спектры мощности и фазового сдвига терагерцевого излучения, интерпретация которых дала возможность оценить время релаксации квазиимпульса ($\sim 10^{-12}$ с), подвижность ($\mu = 4\cdot10^3$ см^2/В·с) и эффективную массу ($m^* = 0{,}21m_0$) основных носителей заряда в исследованных гетероструктурах. С помощью серии частотных спектров мощности и фазового сдвига ТГц-излучения получены температурные зависимости электронной эффективной массы и времени релаксации квазиимпульса в квантовых ямах $In_xGa_{1-x}N/GaN$. Значение подвижности, полученное методом THz–TDS, хорошо согласуется с данными холловских измерений.

Список литературы

1. Popov V.V. // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. 2011. V. 32. P. 1178.
2. Schuster F., Coquillat D., Videlier H., et al. // Optics Express. 2011. V. 19. P. 7827.
3. Pashnev D., Kaplas T., Korotyeyev V.V., et al. // Appl. Phys. Lett. 2020. V. 117. P. 051105.

УДК 535(06)+004(06)

К.А. МАМЯН, А.А. НЕЦВЕТАЕВ,
А.Ю. ФРОЛОВ, А.А. ФЕДЯНИН
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

КОГЕРЕНТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЕМ СВЕТОВОГО ПУЧКА С ПОМОЩЬЮ ТРАПЕЦИЕВИДНОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЁТКИ

Численно продемонстрирован непрерывный поворот оптического пучка в первом порядке дифракции от трапециевидной дифракционной решётки в диапазоне приблизительно 15 градусов с помощью метода освещения стоячей волной.

K.A. MAMIAN, A.A. NETSVETAEV, A.Yu. FROLOV,
A.A. FEDYANIN
Lomonosov Moscow State University

COHERENT BEAM-STEERING WITH A TRAPEZOIDAL DIFFRACTION GRATING

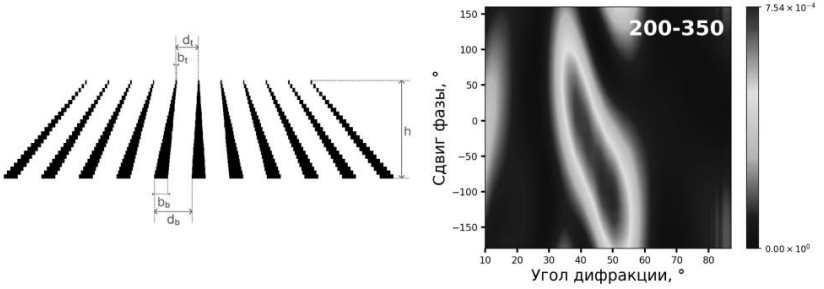
We numerically demonstrate continuous beam-steering in the first order of diffraction from a trapezoidal grating in the range of approximately 15 degrees using the standing wave illumination method.

Способность управлять направлением световых лучей является одной из важнейших задач в современной фотонике, особенно в таких областях, как технологии LIDAR и оптическая связь через свободное пространство. Традиционные устройства, такие как механические и жидкокристаллические модуляторы, применяемые для этих целей, имеют крупные размеры и ограничены в скорости. Переход на фотонные платформы позволит значительно увеличить скорость работы и уменьшить габариты устройств. Основные подходы включают использование активных метаповерхностей с градиентом, медленных световых волн в волноводах и оптических фазированных решёток [1].

В данной работе предлагается альтернативный метод управления направлением распространения света, основанный на дифракционной решётке с плавно меняющимся периодом (рис. 1). Эта структура характеризуется начальным и конечным периодами, и шириной и высотой полос. Структура освещается с помощью двух источников,

расположенных с противоположных сторон решётки, излучение которых падает перпендикулярно на поверхность решётки и интерферирует, создавая узлы и пучности в определенных участках решётки [2], что составляет суть метода когерентного контроля. Варьируя фазовый сдвиг между источниками, можно перемещать пучность излучения вдоль решётки, изменяя период активной подрешётки и тем самым регулируя направление дифракционного порядка.

Для проверки характеристик предложенной структуры были проведены численные расчеты с помощью метода FDTD (метод конечных разностей во временной области). Использовались источники с гауссовым профилем на длине волны 632.8 нм. Параметры структуры следующие: показатель преломления $n = 3.5$ (кремний); период изменяется от $d_t = 725$ нм до $d_b = 1225$ нм, ширина полос от $b_t = 200$ нм до $b_b = 350$ нм (сверху вниз), высота решётки $h = 155$ нм. На рис. 1 показана зависимость интенсивности первого дифракционного порядка от угла дифракции φ и фазового сдвига θ между источниками. Видно, что диапазон перестройки угла пучка составляет приблизительно 15 градусов: от 38 до 53 градусов.



а *б*

Рис. 1. Схематический вид структуры (*а*), зависимость интенсивности первого порядка дифракции от угла дифракции и сдвига фазы (*б*)

Список литературы

1. Lin S., et al. // Nanophotonics. 2022. V. 11. P. 2617-2638.
2. He F., et al. // Opt. Express. 2020. V. 28. P. 30107-30116.

А.В. ШЕСТЕРИКОВ[1,2], М.Ю. ГУБИН[1,2], А.В. ПРОХОРОВ[1,2]
[1]*Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых*
[2]*Московский центр перспективных исследований*

ЧАСТОТНО-НАСТРИВАЕМОЕ МЕТАЗЕРКАЛО НА ОСНОВЕ ТРИМЕРОВ НАНОЧАСТИЦ ИЗ ДИХАЛЬКОГЕНИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

Теоретически исследуется оптический отклик тримеров из сферических наночастиц дихалькогенидов переходных металлов, расположенных в вершинах треугольника. Бианизотропный отклик отдельных частиц в тримере позволяет возбуждать парные квазизапертые моды (КЗМ) в метаповерхности, составленной из таких тримеров. В спектральном промежутке между резонансами КЗМ наблюдается эффективное отражения электромагнитных волн метаповерхностью.

A.V. SHESTERIKOV[1,2], M.Yu. GUBIN[1,2], A.V. PROKHOROV [1,2]
[1]*Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs*
[2]*Moscow Center for Advanced Studies*

FREQUENCY-TUNABLE METAMIRROR BASED ON TRANSITION METAL DICHALCOGENIDE NANOPARTICLE TRIMERS

The optical response of trimers of spherical nanoparticles of transition metal dichalcogenides located at the vertices of a triangle is theoretically investigated. The bianisotropic response of individual particles in the trimer allows exciting paired quasi-trapped modes (QTM) at different wavelengths in a metasurface made of them, forming a wide region of effective reflection between the QTM resonances.

С целью оптимизации геометрии численно были рассчитаны сечения рассеяния и мультипольная декомпозиция для тримерной структуры, составленной из сферических наночастиц на основе WS_2 и MoS_2 материалов, расположенных в вершинах треугольника (рис. 1а). При облучении плоскополяризованной волной с поляризацией $E_y(k_z)$ выявлено наличие бианизотропного отклика тримера, в том числе возбуждение нормальной к его плоскости компоненты m_z магнитного диполя. Рассчитаны магнитные дипольные поляризуемости отдельных частиц MoS_2 и WS_2 в составе тримера, что позволило настроить периоды P_1 и P_2 правильных решёток таких тримеров для возбуждения квазизапертых мод на двух различных длинах волн. Используя неправильную решётку

тримеров, с периодами $P_x = P_1$ и $P_y = P_2$ показана возможность возбуждения сразу двух КЗМ, в спектральном промежутке между которыми возникает область эффективного отражения света за счёт возбуждением основной компоненты магнитного диполя m_x. Таким образом, в работе показана принципиальная возможность создания отдельных элементов плоской оптики с настраиваемыми характеристиками на основе метаповерхностей, строительными блоками которых выступают комбинации сферических наночастиц из дихалькогенидов переходных металлов.

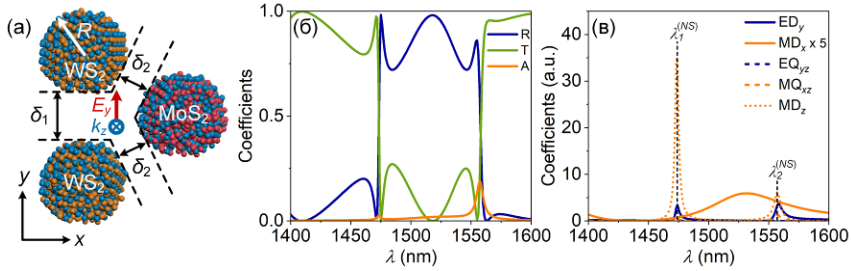


Рис. 1. Структура тримера из сферических MoS_2 и WS_2 наночастиц (а); спектры отражения, пропускания и поглощения (RTA) метаповерхности с периодами P_x = 1046 нм и P_y = 1094 нм, составленной из тримеров частиц с радиусами R = 200 нм и расстояниями между частицами δ_1 = 50 нм, δ_2 = 30 нм, облучаемой плоской волной с поляризацией $E_y(k_z)$ (б); мультипольная декомпозиция отдельного тримера из метаповерхности, приведены, как вклады основных компонент в RTA, так и вклад MD_z, для бианизотропной компоненты (в)

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 24-12-20015.

А.А. НЕРОВНАЯ, А.Ю. ФРОЛОВ, А.А. ФЕДЯНИН
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ОПТИЧЕСКОЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ ПРИ ПОМОЩИ ПЛАЗМОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

В этой работе проводилось экспериментальное оптическое пространственное дифференцирование с помощью плазмонных кристаллов. Были найдены резонансные условия, при которых происходит обнаружение краёв входного изображения без использования громоздких оптических элементов. Данная работа демонстрирует механизм проведения оптических аналоговых вычислений на основе планарных структур вместо электронных аналогов.

A.A. NEROVNAYA, A.Yu. FROLOV, A.A. FEDYANIN
Lomonosov Moscow State University

OPTICAL SPATIAL DIFFERENTIATION BY USING PLASMONIC CRYSTALS

Here we experimentally show optical spatial differentiation using plasmonic crystals. By identifying resonant conditions, we enable edge detection of input images without relying on bulky optical components. This work presents a novel mechanism for optical analog computing by using planar structures as an alternative to conventional electronic analog systems.

В последнее время аналоговые оптические вычисления вызывают большой интерес из-за своей высокой производительности и низкого энергопотребления. Обычно для таких вычислений использовалась громоздкая система линз и фильтров [1]. Но в последнее время была продемонстрирована возможность миниатюризации таких вычислительных элементов до субдлинноволновых масштабов [2, 3]. Эти структуры известны как метаповерхности. Ранее было показано, что пространственное дифференцирование входного сигнала может быть реализовано в тонких плазмонных плёнках за счёт интерференции между прямым отражением на границе и излучением утечки поверхностного плазмон-поляритона (ППП) [4]. Однако эта система довольно громоздкая из-за наличия призмы. В этой работе экспериментально исследуется процесс оптического пространственного дифференцирования на

плазмонных кристаллах, которые обеспечивают более миниатюрную систему по сравнению с плазмонными плёнками с призмой.

Целью данной работы является экспериментальная реализация пространственного оптического дифференцирования и получение границ входных изображений с помощью одномерных плазмонных кристаллов.

Для пространственного оптического дифференцирования главным условием является близость коэффициента отражения к нулю и его пропорциональность модулю волнового вектора падающего света в области резонансных углов падения света. В работе использовался никелевый плазмонный кристалл с периодом 575 нм и глубиной 116 нм. Эти характеристики были ранее специально подобраны для выполнения условия пространственного дифференцирования. На рис. 1 представлено изображение краев щели, полученные с помощью КМОП-камеры, при резонансном угле падения света 24 °, когда коэффициент отражения света близок к нулю. При отдалении от резонансного угла падения света, края изображения будут становиться менее заметными вплоть до исчезновения. На рис. 2 видно, что края щели имеют большую интенсивность по сравнению с остальным изображением, это подтверждает осуществление пространственного оптического дифференцирования.

Указанные функциональные возможности плазмонных кристаллов открывают путь к созданию нового поколения сверхбыстрых, компактных и энергоэффективных вычислительных устройств, основанных на оптическом управлении.

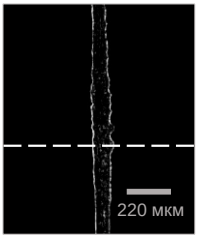


Рис. 1. Изображение краев щели на КМОП-камере

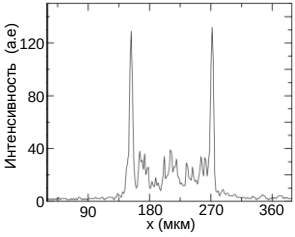


Рис. 2. Пространственное сечение изображения, соответствующее белой пунктирной линии на рис. 1

Список литературы

1. Goodman J. Introduction to Fourier Optics. 1996.
2. Silva A., et al. // Science. 2014. V. 343. P. 160-163.
3. Pors A., et al. // Nano Lett. 2014. V. 15. P. 791-797.
4. Zhu T., et al. //Nat. Commun. 2017. V. 8. P. 15391.

А.Н. ГОЛОДУХИНА[1,2], А.Е. ШИТИКОВ[1], В.Е. ЛОБАНОВ[1],
Д.А. ЧЕРМОШЕНЦЕВ[1,2,3], И.А. БИЛЕНКО[1,2]
[1]*Российский квантовый центр, Сколково*
[2]*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*
[3]*Сколковский институт науки и технологий*

РАМАНОВСКИЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЧАСТОТНЫЕ ГРЕБЁНКИ В ИНТЕГРАЛЬНЫХ РЕЗОНАТОРАХ ИЗ НИТРИДА КРЕМНИЯ

Экспериментально исследовано вынужденное комбинационное рассеяние света в оптическом интегральном микрорезонаторе из нитрида кремния с нормальной дисперсией групповых скоростей. Впервые изучены особенности формирования рамановской оптической частотной гребёнки в таких микрорезонаторах.

A.N. GOLODUKHINA[1,2], A.E. SHITIKOV[1], V.E. LOBANOV[1],
D.A. CHERMOSHENTSEV[1,2,3], I.A. BILENKO[1,2]
[1]*Russian Quantum Centre, Skolkovo*
[2]*Lomonosov Moscow State University*
[3]*Skolkovo Institute of Science and Technology*

RAMAN MICROCOMB IN SILICON NITRIDE MICRORESONATOR

In our research stimulated Raman light scattering in a silicon nitride optical microresonator with normal group velocity dispersion has been experimentally investigated. We studied for the first time the peculiarities of Raman microcomb generation in high-Q microresonator.

Нитрид кремния занимает лидирующие позиции в области создания передовых фотонных устройств, в частности, оптических микрорезонаторов с высокой добротностью [1]. Такие структуры имеют малые оптические потери при чрезвычайно малом объёме моды, что обеспечивает низкий порог проявления нелинейных эффектов. В частности, на платформе интегральных резонаторов из плавленого кварца было изучено вынужденное комбинационное рассеяние света и его влияние на формирование керровских солитонов [2]. Сущность явления комбинационного рассеяния состоит в том, что каждая спектральная линия падающего света сопровождается появлением системы линий изменённой частоты, называемых сателлитами, вследствие взаимодействия с молекулярными колебаниями. Однако, вынужденное

рамановское рассеяние света в интегральных структурах из нитрида кремния до сих пор наблюдалось только в виде сдвига спектра диссипативного керровского солитона в резонаторах с аномальной дисперсией [3]. Данная работа посвящена изучению рамановских гребёнок в интегральных структурах из нитрида кремния.

В эксперименте в качестве источника накачки используется перестраиваемый лазер, чье излучение усиливается до 200 мВт эрбиевым усилителем. Возбуждение гребёнки осуществляется путём непрерывной перестройки частоты лазера до достижения необходимой отстройки. Используется микрорезонатор из нитрида кремния в режиме критической связи с областью свободной дисперсии 170 ГГц и собственной добротностью около 10 миллионов.

Начало генерации вынужденного комбинационного рассеяния при накачке от 1520 до 1570 нм наблюдается в широком диапазоне длин волн от 1601 до 1663 нм в зависимости от длины волны накачки. При увеличении мощности накачки начинается формирование рамановской гребёнки (рис. 1). Около накачки формируется керровская гребёнка.

Таким образом, в нашей работе впервые экспериментально демонстрируются частотные гребёнки в микрорезонаторах из нитрида кремния, вызванные вынужденным комбинационным рассеянием. Полученные результаты увеличивают потенциал нитрида кремния как материала для создания передовых фотонных устройств.

Данная работа была поддержана Госкорпорацией «Росатом» в рамках Дорожной карты по квантовым вычислениям (Договор № 868-1.3-15/15-2021 от 5 октября 2021).

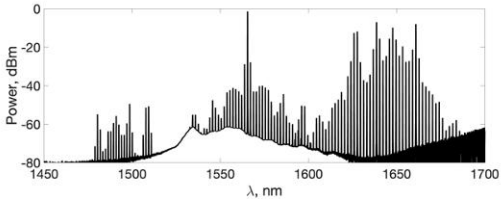


Рис. 1. Пример полученной рамановской оптической частотной гребёнки в микрорезонаторе из нитрида кремния

Список литературы

1. Strekalov D.V., et al. Nonlinear and quantum optics with whispering gallery resonators // J.Opt. 2016. V. 18. P. 123002.

2. Yang Q.-F., Yi X., Yang K.Y., Vahala K. Stokes solitons in optical microcavities // Nature Physics. 2017. V. 13. P. 53-57.

3. Karpov M., et al. Raman self-frequency shift of dissipative Kerr solitons in an optical microresonator // Physical Review Letters. 2016. V. 116 (10). P. 103902.

М.Ю. ГУБИН[1,2], А.В. ШЕСТЕРИКОВ[1,2], А.В. АРСЕНИН[3,4], В.С. ВОЛКОВ[4], А.В. ПРОХОРОВ[1,2]

[1]Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых
[2]Московский центр перспективных исследований
[3]Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный
[4]Исследовательский центр новых технологий XPANCEO, Дубай, ОАЭ

УПРАВЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫМИ ОСОБЕННОСТЯМИ РАСТЯГИВАЕМЫХ КРЕМНИЕВЫХ МЕТАПОВЕРХНОСТЕЙ С КВАЗИЗАПЕРТЫМИ МОДАМИ

Рассматриваются полностью диэлектрические кремниевые метаповерхности, состоящие из дисков с разрезом и размещённые на низкорефрактивных растягиваемых подложках. Приведены результаты мультипольного и спектрального анализа рассматриваемых метаповерхностей. Вблизи длины волны квазизапертой моды метаповерхности получена почти 100 % модуляция отражения / пропускания света за счёт одновременного изменения зазора в дисках и периода метаповерхности при небольшой линейной деформации подложки.

M.Yu. GUBIN[1,2], A.V. SHESTERIKOV[1,2], A.V. ARSENIN[3.4], V.S. VOLKOV[4], A.V. PROKHOROV[1,2]

[1]Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs
[2]Moscow Center for Advanced Studies
[3]Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny
[4]Emerging Technologies Research Center XPANCEO, Dubai, United Arab Emirates

CONTROL OF SPECTRAL FEATURES OF STRETCHABLE SILICON METASURFACES WITH QUASI-TRAPPED MODES

The all-dielectric silicon metasurfaces composed of split disks and paced on the stretchable low-refractive index substrates are considered. The results of multipole and spectral analysis of considered metasurfaces are presented. It was shown that almost 100% modulation of light reflectance/transmittance for the metasurface occurs near the wavelength of its quasi-trapped mode due to the simultaneous changing the gap in disks and metasurface's period owing to small linear deformation of the substrate.

Оптические диэлектрические метаповерхности, поддерживающие возбуждение квазизапертых мод (КЗМ), становятся всё более привлекательными для расширения элементной базы современной

нанофотоники. Актуальной задачей здесь остаётся перестройка оптических характеристик таких метаповерхностей по требованию во время их работы. Одним из решений является использование перестраиваемых метаповерхностей на основе гибких подложек. В этой работе предлагается использовать высокодобротные КЗМ-резонансы диэлектрических метаповерхностей на растягиваемых подложках для глубокой модуляции коэффициента отражения/пропускания света (рис. 1).

Ключевой идей работы является использование специального вида дефекта в виде разделения Si диска пополам и разнесения половинок на дистанцию $\delta_c = \delta_c^{+} + \delta_c^{-}$ (рис. 1a). Нормальное облучение такого диска линейно-поляризованной плоской волной $E_x(k_z)$ приводит к возбуждению магнитной октупольной моды, что является результатом параметрического слияния магнитных квадрупольных мод, возбуждаемых в каждой половине диска. В метаповерхности, составленной из дисков с разрезом, может возбуждаться сильная магнитная октупольная КЗМ (МОКЗМ) при некоторых значениях δ_c и нормальном падении света на неё. Управление резонансом осуществляется варьированием величины $\delta_c \equiv P_y - P_x$ при расположении метаповерхности на растяжимой подложке из аэрогеля, где P_x соответствует неизменному периоду по направлению оси x, а P_y – периоду, изменяющемуся вслед за деформациями подложки в направлении оси y (рис. 1b). В результате оптимизации были подобраны параметры кремниевой метаповерхности, позволяющие наблюдать почти 100 % модуляцию коэффициента отражения / пропускания света вблизи длины волны 1240 нм (рис. 1c). Возбуждение МОКЗМ в метаповерхности происходит за счёт решёточного анапольного эффекта, при котором набег фазы $\Delta\varphi$ прошедшей волны относительно падающей равен нулю (рис. 1c).

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (Грант № 24-12-20015).

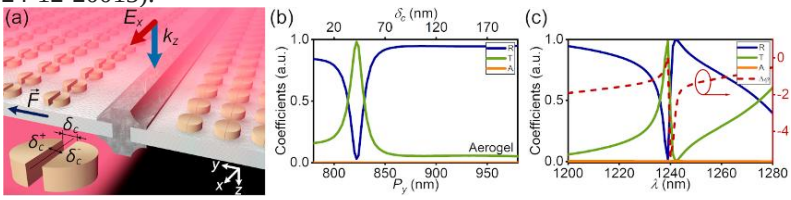


Рис. 1. Модель растягиваемой метаповерхности из Si дисков с разрезом (a); зависимости коэффициентов отражения (R), пропускания (T) и поглощения (A) света метаповерхностью на подложке из аэрогеля от периода P_y. (b); спектральные зависимости коэффициентов R, T и A и набега фаз $\Delta\varphi$ для метаповерхности при δ_c = 40 нм, параметры метаповерхности: P_x = 780 нм, высота и диаметр целого Si диска 460 и 613 нм соответственно (c)

УДК 535(06)+004(06)

П.А. ШУЛЫНДИН, Б.В. РУМЯНЦЕВ, Е.А. МИГАЛЬ,
А.В. ПУШКИН, Ф.В. ПОТЁМКИН
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

РОЛЬ ВЫНУЖДЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ В ПРОЦЕССЕ ГЕНЕРАЦИИ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ В ГАЗЕ В ПРИСУТСТВИИ СИЛЬНОГО ТЕРАГЕРЦЕВОГО ПОЛЯ

В рамках данной работы экспериментально продемонстрирована генерация второй гармоники в процессе четырёхволнового смешения (ЧВС) при воздействии на изотропную газовую среду (Ar) высокоинтенсивного фемтосекундного лазерного излучения системы на кристалле Cr:Forsterite с центральной длиной волны 1.24 мкм в присутствии сильного (до 7.5 МВ/см) терагерцевого (ТГц) поля. Показано, что формирующаяся при высоких энергиях ИК-импульса (3.5 мДж) плазма имеет вынужденный характер излучения в полосе излучения второй гармоники (600 - 640 нм), что приводит к его конструктивной интерференции с излучением второй гармоники, индуцированным ТГц-полем, и формированию однополярного сигнала, линейного по амплитуде ТГц-поля.

P.A. SHULYNDIN, B.V. RUMIANTSEV, E.A. MIGAL,
A.V. PUSHKIN, F.V. POTEMKIN
Lomonosov Moscow State University

THE ROLE OF STIMULATED PLASMA RADIATION DURING THE PROCESS OF SECOND HARMONIC GENERATION IN THE PRESENCE OF A STRONG TERAHERTZ FIELD

Second harmonic generation through the process of four-wave mixing (FWM) in an isotropic gas medium (Ar) under the influence of high-intensity femtosecond laser radiation from a Cr:Forsterite system with a central wavelength of 1.24 μm in the presence of a strong (up to 7.5 MV/cm) terahertz (THz) field was demonstrated. It was shown that, at high IR pulse energies (3.5 mJ), the generated plasma exhibits stimulated emission in the second harmonic spectrum band (600 - 640 nm), leading to constructive interference with the second harmonic induced by the THz field and the formation of a unipolar signal with linear dependence of its amplitude on the THz field strength.

Разработанные методы генерации и детектирования терагерцевого (ТГц) излучения открывают возможности для проведения время-разрешённой ТГц-спектроскопии, неинвазивной диагностики тканей и клеток, а также эффективного ускорения заряженных частиц. В отличие от распространённого метода электрооптического детектирования (ЭОД)

ТГц-поля [4], являющегося ограниченным по спектральной полосе пропускания и допустимой пиковой интенсивности ТГц-импульса, метод ЧВС [5], основанный на генерации второй гармоники в газах в присутствии ТГц-поля, не имеет подобных ограничений, однако требует достижения высоких интенсивностей (10^{15} Вт/см^2) генерирующего излучения для реализации линейного по полю режима детектирования ТГц-излучения, что усложняет его практическую реализацию.

В работе предложен альтернативный метод регистрации временной формы ТГц-поля, основанный на конструктивной интерференции между второй гармоникой, генерирующейся в процессе ЧВС в газовой среде (Ar) при двухцветном воздействии на неё фемтосекундного лазерного излучения ближнего ИК-диапазона (1.24 мкм) и сильного (до 7.5 МВ/см) ТГц-поля, и индуцированным ей вынужденным излучением плазмы на частотах, лежащих в полосе второй гармоники (600 - 640 нм). Данный метод позволяет получить линейную зависимость энергии второй гармоники от пикового значения ТГц-поля (рис. 1), а также реализовать линейный по амплитуде ТГц-поля режим детектирования ТГц-излучения с однополярной формой сигнала (вставка на рис 1) при энергии ИК-импульса 3.5 мДж (пиковой интенсивности на уровне 10^{14} Вт/см^2).

Работа поддержана грантом РНФ № 25-22-00084. Румянцев Б.В. является стипендиатом фонда развития теоретической физики и математики БАЗИС. Оборудование, использованное в данной работе, приобретено при поддержке Программы Развития МГУ и Национального Проекта “Наука и Университеты”.

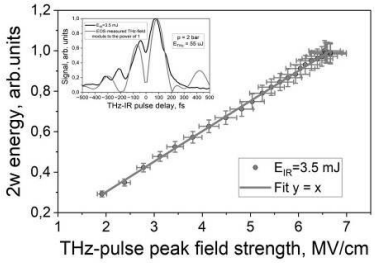


Рис. 1. График зависимости энергии второй гармоники от пикового значения ТГц-поля при энергии ИК-импульса 3.5 мДж, на вставке показана зависимость сигнала второй гармоники от временной задержки между ТГц- и ИК-импульсами, а также модуль временной формы ТГц-импульса, полученной в методе ЭОД

Список литературы

1. Wu Q., Zhang X.C. // Applied Physics Letters. 1995. V. 24. P. 3523-3525.
2. Dai J., Xie X., Zhang X. C. // Physical Review Letters. 2006. V. 10. P. 103903.

УДК 535(06)+004(06)

М.В. ЛЕВУСЬ[1,2], Г.Э. РИЗАЕВ[1,2], Д.В. ПУШКАРЕВ[1,2],
Л.В. СЕЛЕЗНЕВ[1,2]
[1]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
[2]Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ ПЛАЗМЫ ОДНОЦВЕТНОГО ФИЛАМЕНТА

Экспериментально исследован характер зависимости энергии терагерцового излучения в зависимости от энергии и длительности лазерного импульса.

M.V. LEVUS[1,2], G.E. RIZAEV[1,2], D.V. PUSHKAREV[1,2],
L.V. SELEZNEV[1,2]
[1]Lomonosov Moscow State University
[2]Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

ENERGY CHARACTERISTICS OF TERAHERTZ EMISSION FROM SINGLE-COLOR FILAMENT PLASMA

The dependence of terahertz radiation energy on laser pulse energy and duration is experimentally investigated.

Плазменные каналы, образующиеся при филаментации ультракоротких лазерных импульсов, являются источником терагерцового (ТГц) излучения. Пространственное распределение такого источника неоднородно в пространстве и исследовано в недавней работе [1]. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование энергетических характеристик терагерцового излучения на разных частотах при различных числовых апертурах лазерного пучка, энергии и длительности лазерного импульса.

В эксперименте использовались лазерные импульсы с минимальной длительностью 90 фс, которые могли быть растянуты до 900 фс. Центральная длина волны была 750 нм. Энергия лазерного импульса варьировалась от 1 до 5 мДж. В эксперименте регистрация ТГц-излучения осуществлялась с помощью болометра, регистрирующего излучение в диапазоне от 0,1 до 10 ТГц, а для выделения определенных частот использовался набор узкополосных фильтров. Методика эксперимента основывалась на получении двумерных распределений ТГц-излучения в пространстве. Энергия ТГц-излучения рассчитывалась суммированием

сигналов по элементарным площадкам полученной диаграммы направленности.

На рис. 1 представлена зависимость энергии ТГц-излучения от энергии накачки при фиксированной числовой апертуре пучка на различных частотах. Характер зависимости близок к линейному в представленном диапазоне энергий. На рис. 2 представлена зависимость энергии ТГц-излучения от изменения длительности импульса на разных частотах. Сигналы для каждой частоты нормированы на значение энергии при минимальной длительности. Знак изменения длительности Δt по оси абсцисс определялся типом чирпирования импульса: положительный и отрицательный. Для каждой частоты энергия ТГц-излучения достигает своего максимума при определенной длительности импульса. Значение Δt, соответствующее максимуму терагерцовой энергии, уменьшается с увеличением частоты.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 24-19-00461.

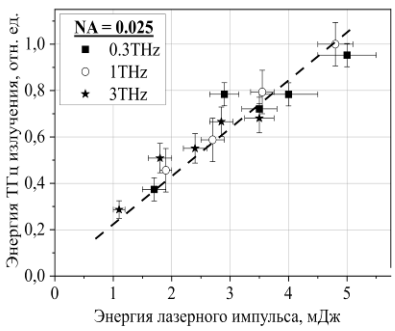


Рис. 1. Зависимость энергии ТГц-излучения от энергии лазерного импульса при фиксированной числовой апертуре на различных частотах

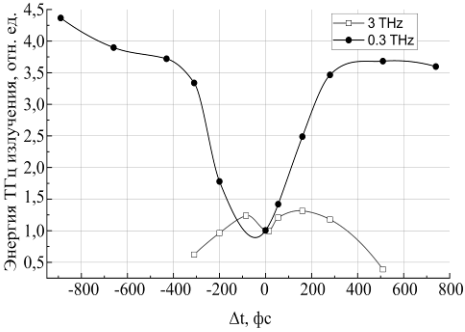


Рис. 2. Зависимость энергии ТГц-излучения от изменения длительности импульса на разных частотах

Список литературы

1. Nikolaeva I.A., et al. // Optics Express. 2023. V. 31. No. 25. P. 41406-41419.

УДК 535(06)+004(06)

Б.В. РУМЯНЦЕВ, Е.А. МИГАЛЬ, А.В. ПУШКИН,
Ф.В. ПОТЁМКИН
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ГЕНЕРАЦИЯ ГАРМОНИК ВЫСОКОГО ПОРЯДКА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ БЛИЖНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА НА ГАЗОВУЮ СРЕДУ В ПОЛЕ МАЛОПЕРИОДНОГО ИНТЕНСИВНОГО ТЕРАГЕРЦЕВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Приведены результаты по генерации гармоник высокого порядка с энергиями фотонов на уровне 60 - 80 эВ при воздействии фемтосекундного лазерного излучения ближнего ИК-диапазона (центральная длина волны 1.24 мкм, пиковая напряжённость 300 МВ/см) на газовую среду в присутствии сильного терагерцевого излучения (центральная длина волны 100 мкм, пиковая напряжённость поля 7.5 МВ/см). Показано, что добавление терагерцевого излучения приводит к появлению в спектре гармоник чётных порядков и подавлению гармоник нечётных порядков. Продемонстрировано, что данная модуляция в спектре гармоник объясняется интерференцией излучения, генерируемого на масштабах оптического цикла ИК-поля. Полученные результаты представляют собой первый шаг к экспериментальному управлению спектрально-временными свойствами аттосекундного излучения с использованием синтезированных длинноволновых полей.

B.V. RUMIANTSEV, E.A. MIGAL, A.V. PUSHKIN, F.V. POTEMKIN
Lomonosov Moscow State University

HIGH-ORDER HARMONICS GENERATION UNDER THE EXCITATION OF A GASEOUS MEDIUM BY FEMTOSECOND NEAR-INFRARED LASER RADIATION IN THE FIELD OF FEW-CYCLE INTENSE TERAHERTZ RADIATION

The results on the high-order harmonics generation with photon energies at the level of 60 - 80 eV under excitation of gaseous medium by femtosecond near-infrared laser radiation (central wavelength is 1.24 um, peak intensity is 300 MV/cm) in the presence of strong terahertz radiation (central wavelength is 100 microns, peak field strength is 7.5 MV/cm) are presented. It is shown that the addition of terahertz radiation leads to the emergence of even-order harmonics in the spectrum and suppression of odd-order harmonics. It is demonstrated that this modulation in the harmonic spectrum is explained by the interference of radiation generated at the timescales of the IR-field optical cycle.

The obtained results represent the first step towards experimental control of the spectral-temporal properties of attosecond radiation using synthesized long-wavelength fields.

Современные исследования в области генерации гармоник высокого порядка (ГГВП) направлены на повышение эффективности генерации, расширение спектрального диапазона генерируемого излучения в сторону более высоких энергий фотонов и управление фазовым спектром генерируемого излучения для получения более коротких аттосекундных импульсов. Одним из перспективных подходов для решения этих исследовательских задач является синтез генерирующих оптических полей, который позволяет формировать сложные временные зависимости генерирующего поля и может быть реализован с помощью многоцветной комбинации лазерных импульсов.

В работе представлены экспериментальные результаты по ГГВП в аргоне синтезированным лазерным полем, состоящем из малопериодного терагерцевого излучения [2] и фемтосекудного излучения ближнего ИК-диапазона лазерной системы на кристалле Cr:Forsterite [3]. Проведённые исследования показали, что терагерцовое электрическое поле нарушает симметрию ИК-поля, что приводит к генерации гармоник чётных порядков и подавлению гармоник нечётных порядков (рис. 1). Указанная спектральная модуляция объясняется интерференцией аттосекундных импульсов, генерирующихся на масштабах оптического цикла ИК-поля.

Работа поддержана грантом РНФ № 25-22-00084. Румянцев Б.В. является стипендиатом фонда развития теоретической физики и математики БАЗИС. Оборудование, использованное в данной работе, приобретено при поддержке Программы Развития МГУ и Национального Проекта “Наука и Университеты”.

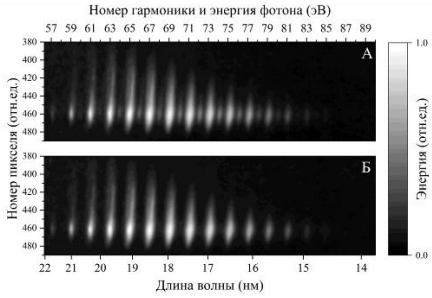


Рис. 1. Регистрируемые спектры гармоник высокого порядка в присутствии (А) и в отсутствие (Б) терагерцевого излучения

Список литературы

1. Rumiantsev B.V., et al. // JETP Lett. 2023. V. 117. No. 8. P. 566-573.
2. Pushkin A.V., et al. // Photonics. 2022. V. 9. No. 2. P. 90.

УДК 535(06)+004(06)

С.В. ФАДЕЕВ, А.А. ПЛЕХАНОВ, Т.С. МОЛЬКОВ,
И.Л. МАРТЫНОВ, А.А. ЧИСТЯКОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ТЕРАГЕРЦОВЫХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ

Приведены результаты экспериментов по детектированию органических соединений, в частности RDX, с помощью терагерцовых метаматериалов. Особое внимание уделяется возможности использования метаматериалов для детектирования следовых количеств таких веществ в виде порошков с характерным размером частиц ~ 500 - 600 мкм.

S.V. FADEEV, A.A. PLEKHANOV, T.S. MOLKOV,
I.L. MARTYNOV, A.A. CHISTYAKOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

DETECTION OF ORGANIC COMPOUNDS USING TERAHERTZ METAMATERIALS

Presents the results of experiments on detection of organic compounds, in particular RDX, using terahertz metamaterials. Particular attention is paid to the possibility of using metamaterials for detection of trace amounts of such substances in the form of powders with a characteristic particle size of ~ 500 - 600 μm.

В настоящее время активно ведутся исследования в области терагерцовой (ТГц) спектроскопии и визуализации. Важным направлением ТГц-фотоники является разработка ТГц-метаматериалов и детектирование с помощью них различных веществ [1]. При этом известно [2 - 4], что многие органические вещества в твёрдом состоянии имеют характеристические полосы поглощения в ТГц-области.

Цель данной работы – изучение возможности детектирования сложных органических веществ с помощью ТГц-метаматериалов.

В качестве исследуемого вещества был выбран 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазациклогексан (RDX). Спектр поглощения RDX содержит интенсивную характеристическую полосу поглощения в области ~ 0,8 ТГц [2, 5], что открывает возможность для обнаружения и идентификации этого соединения и смесей на его основе методами ТГц-спектроскопии.

В общем случае метаматериалы имеют сложную структуру, поэтому для расчёта их спектральных характеристик в ТГц-диапазоне

используются различные численные методы для решения уравнений Максвелла. В данной работе применялся метод конечных разностей во временной области (FDTD). Для его реализации был выбран MEEP (MIT Electromagnetic Equation Propagation) [6], предназначенный для симуляции электромагнитных явлений методом FDTD.

На основе расчётов были подобраны параметры ТГц-метаматериалов с полосами пропускания в частотной области полосы поглощения RDX (~ 0,8 ТГц) (рис. 1). В результате экспериментов были получены ТГц-спектры пропускания RDX на поверхности метаматериалов (рис. 2), а также продемонстрирована возможность детектирования порошков RDX с характерным размером частиц ~ 500 - 600 мкм с помощью указанных структур.

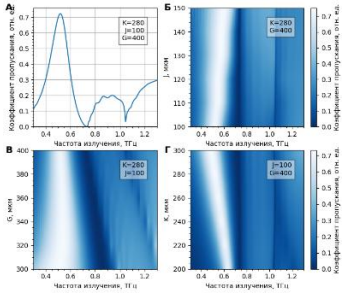


Рис. 1. ТГц-спектры пропускания метаматериалов, полученные с помощью симуляции MEEP.

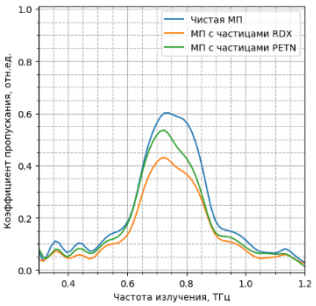


Рис. 2. Экспериментальные ТГц-спектры пропускания чистой метаповерхности и метаповерхности с различными веществами (в том числе с RDX).

Список литературы

1. Xu W., Xie L., Ying Y. Mechanisms and applications of terahertz metamaterial sensing: A review // Nanoscale. Royal Society of Chemistry. 2017. V. 9. No. 37. P. 13864-13878.

2. Fitch M.J., et al. Molecular absorption cross-section and absolute absorptivity in the THz frequency range for the explosives TNT, RDX, HMX, and PETN // Chem. Phys. Lett. 2007. V. 443. No. 4–6. P. 284–288.

3. Leahy-Hoppa M.R., Fitch M.J., Osiander R. Terahertz spectroscopy techniques for explosives detection // Anal. Bioanal. Chem. 2009. V. 395. No. 2. P. 247–257.

4. van Mechelen J.L.M., Kuzmenko A.B., Merbold H. Stratified dispersive model for material characterization using terahertz time-domain spectroscopy // Opt. Lett. 2014. V. 39. No. 13. P. 3853.

5. Plekhanov A.A., et al. Study of terahertz reflection spectra of optically thin RDX samples by terahertz imaging with spectral resolution // Opt. Eng. 2023. V. 62. No. 03. P. 1-13.

6. Oskooi A.F., et al. Meep: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method // Comput. Phys. Commun. Elsevier B.V. 2010. V. 181. No. 3. P. 687-702.

УДК 535(06)+004(06)

Е.А. МИГАЛЬ, А.В. ПУШКИН, Ф.В. ПОТЁМКИН
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ЧЁТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ГАРМОНИК В УСЛОВИЯХ НАРУШЕНИЯ СИММЕТРИИ ИНТЕНСИВНЫМ ТЕРАГЕРЦЕВЫМ ПОЛЕМ

Используя терагерцевое (ТГц) поле с напряжённостью до 7 МВ/см, в работе продемонстрирована генерация второй и четвёртой гармоник импульса ближнего ИК-диапазона (1,65 мкм) с эффективностью 10^{-2} % и 10^{-5} %, разделённых во времени на 3,2 пс в кристалле CdS длиной 1,4 мм. Исследованы основные особенности генерации и определены физические механизмы «запаздывания» сигнала четвёртой гармоники. Показано, что применение экстремального ТГц-поля приводит к сопоставимой интенсивности чётных и нечётных гармоник, демонстрируя потенциал бихроматической накачки для создания синтезированной среды с управляемыми нелинейными свойствами.

E.A. MIGAL, A.V. PUSHKIN, F.V. POTEMKIN
Lomonosov Moscow State University

EFFICIENT EVEN HARMONIC GENERATION IN A SEMICONDUCTOR UNDER SYMMETRY BREAKING INITIATED BY AN INTENSE TERAHERTZ FIELD

We demonstrate generation of the second and fourth harmonics of a near-IR pulse (1.65 μm) with an efficiency of 10^{-2} % and 10^{-5} % separated in time by 3.2 ps in a 1.4 mm long CdS crystal in the presence of a strong (7 MV/cm) THz field. The main features of the nonlinear process and the physical mechanisms of the delayed fourth harmonic are studied. It is shown that the use of an extreme THz field leads to the comparable intensities of even and odd harmonics, demonstrating the potential of bichromatic pumping for creating a synthesized medium with controllable nonlinear properties.

Манипулирование свойствами симметрии кристалла может обеспечить путь к уникальным материалам с синтезированной нелинейностью и открывает возможности для высокоинтенсивной генерации света с заданными свойствами. Использование терагерцевых (ТГц) импульсов позволяет управлять симметрией кристаллов, однако, на сегодняшний день все исследования были сосредоточены на использовании ТГц-полей относительно невысокой напряжённости (до 0,5 МВ/см) [1, 2], что связано с отсутствием высокоэффективных ТГц-преобразователей. В этой работе

мы демонстрируем использование интенсивного ТГц-поля для сверхбыстрого управления симметрией полупроводников и выходом чётных гармоник.

Для экспериментов использовалась лазерная система на кристалле Cr:Forsterite. ТГц-импульс с энергией до 80 мкДж был сгенерирован путем оптического выпрямления части излучения накачки в кристалле DAST. Остальная часть излучения использовалась для накачки параметрического усилителя. ТГц-импульс (3 ТГц, 530 фс) и сигнальный импульс параметрического усилителя (1,65 мкм, 100 фс) были объединены с помощью параболического зеркала с отверстием и сфокусированы в образец CdS толщиной 1,4 мм вырезанный в плоскости (0001).

Рис. 1 демонстрирует спектры гармоник, полученные в присутствии ТГц-поля в CdS с временным разрешением. Видно, что добавление ТГц-поля (при нулевой задержке) ведёт к появлению чётных гармоник, интенсивность которых сравнима с интенсивностью нечётных. Короткая длительность ТГц-импульса приводит к генерации гармоник вблизи поверхностей кристалла, образуя два максимума (при задержке 0 и 3,2 пс). Значительное влияние поглощения на гармоники с частотой, превышающей ширину запрещённой зоны, приводит к генерации четвёртой гармоники лишь от задней поверхности кристалла (при 3,2 пс), что обуславливает временную задержку между эффективной генерацией второй и четвертой гармоник. Дальнейшее исследование процесса генерации гармоник с использованием ТГц-излучения позволит расширить предельные режимы преобразования в нелинейной оптике и предоставит новые инструменты для создания сверхбыстрых переключателей.

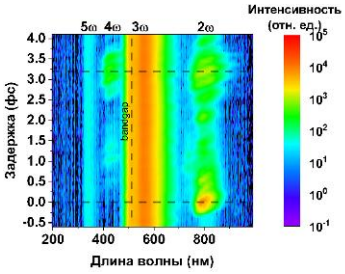


Рис. 1. Спектрохронограмма излучения гармоник, генерируемых в двуцветном поле импульсов ближнего ИК (5 х 10^{13} Вт/см^2) и ТГц (7 х 10^{10} Вт/см^2) диапазона

Список литературы

1. Vampa G., et al. // Nat. photon. 2018. V. 12 P. 465-468.
2. Li S., et al. // Nat. Comm. 2023. V. 14 P. 2603.

УДК 535(06)+004(06)

В.Б. НОВИКОВ
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

УПРАВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ ВИХРЯМИ МЕТОДОМ ЧИРПИРОВАНИЯ

Теоретически исследовано формирование пространственно-временных оптических вихрей при прохождении чирпированных лазерных импульсов через структуры с фазовой сингулярностью в частотно-угловом спектре комплексного коэффициента пропускания. Показано, что чирпирование падающего фемтосекундного импульса света позволяет подавить дифракционный распад, характерный для вихревых импульсов при их распространении в свободном пространстве. Показано, что варьирование величины чирпа дает возможность смещать пространственную область формирования этих состояний света.

V.B. NOVIKOV
Lomonosov Moscow State University

CHIRP-MEDIATED CONTROL OF SPATIOTEMPORAL OPTICAL VORTICES

The formation of spatiotemporal optical vortices (STOVs) at the transmission of chirped laser pulses through structures with the phase singularity in the frequency-angle spectrum of the complex transmission coefficient is theoretically investigated. It is shown that chirping of the incident femtosecond light pulses allows to suppress the diffraction breakup of STOVs during their propagation in free space. It is shown that the variation of the chirp value allows to shift the spatial region of the formation of these states of light.

Вихревые лазерные пучки вызывают интерес в фотонике из-за характерной винтовой дислокации фазы поля, приводящей к наличию продольного орбитального углового момента и кольцеобразному распределению интенсивности света в них, что нашло применение в устройствах управления микрочастицами и передачи данных. Недавно особое внимание получили пространственно-временные вихревые лазерные импульсы с «закрученностью» фазы оптического поля в координатах пространство-время [1]. В результате такие пучки способны переносить поперечный орбитальный угловой момент, ориентированный перпендикулярно направлению распространения излучения.

Перспективно получение таких состояний света путем пропускания фемтосекундного лазерного импульса через метаматериалы с фазовой

сингулярностью комплексного коэффициента пропускания [2]. Однако сформированный вихревой импульс, испытывая дифракцию, сильно искажается при движении в свободном пространстве [2, 3].

В работе предложен метод подавления дифракционного распада пространственно-временных оптических вихрей, основанный на чирпировании падающих на метаматериал лазерных импульсов. Рассмотрено прохождение через метаматериал чирпированных импульсов света, ограниченных в пространстве и времени и характеризуемых безразмерным параметром чипа β.

Метаматериал имел фазовую сингулярность коэффициента пропускания $T(k_x,\omega) \sim (k_x\sigma+i\tau(\omega-\omega_0))$, где ω – частота света, ω_0 – центральная частота импульса, k_x – тангенциальная компонента волнового вектора падающей волны, σ и τ – поперечная ширина и длительность нечирпированного импульса. Расчёты показали, что при $\beta = 0$ получаемый вихревой импульс распадается на два импульса при удалении от метаматериала свыше рэлеевской длины $z_0 = k_0\sigma^2$, где k_0 – вакуумное волновое число (рис. 1а). Обнаружено, что чирпирование восстанавливает кольцеобразную форму импульса даже при многократном превышении z_0. Показано, что для формирования оптического вихря на расстоянии $z = Z \cdot z_0$ требуется величина чирпа $\beta = -Z$ (рис. 1б), что позволяет управлять пространственной областью получения вихревых импульсов (рис. 1б). Установлены значения чирпа, обеспечивающие высокое качество вихревого распределения поля даже при бесконечном удалении импульса от структуры.

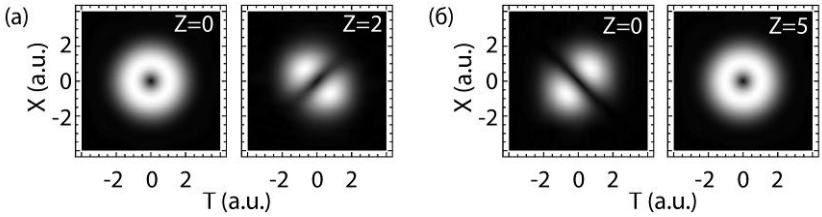


Рис. 1. Пространственно-временное распределение амплитуды электрического поля импульса на дистанции $z = Z \cdot z_0$ от метаматериала для $\beta = 0$ (а), $\beta = -5$ (б). T – «бегущее» время и X – поперечная координата

Список литературы

1. Zhan Q. // Advances in Optics and Photonics. 2024. V. 16. P. 163.
2. Novikov V.B, Murzina T.V. // Optics Letters, 2023. V. 48. P. 2134-2137.
3. Hancock S.W. et al. // Optica. 2019. V. 6. P. 1547-1553.

УДК 535(06)+004(06)

Е.А. ВАШУКЕВИЧ, Т.Ю. ГОЛУБЕВА
Санкт-Петербургский государственный университет

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ПЕРЕПУТЫВАЮЩИЕ ОПЕРАЦИИ НАД АНСАМБЛЕМ ДВУХКУБИТНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ МНОГОМОДОВОГО СВЕТОАТОМНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

В работе представлен анализ запутывающих и нелокальных свойств операций в квантовом неразрушающем (QND) взаимодействии между кубитами, построенными на состояниях многомодового света с орбитальным угловым моментом и атомного ансамбля. Протокол состоит из двух QND-операций и вращения операторов квадратур атомной спиновой когерентности и света. Показано, что при выборе подходящих значений управляющих параметров, таких как длительность QND-взаимодействий и углы поворотов атомного и светового кубитов, протокол позволяет реализовать детерминированную нелокальную операцию SWAP и запутывающую операцию √SWAP с вероятностью 1/3.

E.A. VASHUKEVICH, T.Yu. GOLUBEVA
Saint-Petersburg State University

PARALLEL ENTANGLING OPERATIONS ON AN ENSEMBLE OF TWO-QUBIT SYSTEMS BASED ON MULTIMODE LIGHT-ATOMIC INTERACTION

The work presents an analysis of the entangling and non-local properties of operations in the quantum non-destructive (QND) interaction between qubits based on the states of multimode light with orbital angular momentum and an atomic ensemble. The protocol consists of two QND operations and rotation of the quadrature operators of atomic spin coherence and light.. It is shown that with appropriate selection of control parameters, such as the duration of the QND interactions and the rotation angles of the atomic and light qubits, the protocol allows to perform a deterministic non-local SWAP operation and an entangling √SWAP operation with a probability of 1/3.

В квантовых вычислениях в дискретных переменных на фотонной платформе для кодирования логических объектов в качестве ресурса используются дискретные степени свободы фотона, например, поляризация (на состояниях с определённой поляризацией можно закодировать двумерный логических объект – кубит) [1] или орбитальный угловой момент света (ОУМ) (который кодирует многомерное логическое

состояние – кудит) [2]. Для построения произвольной унитарной вычислительной операции в дискретных переменных необходимо обеспечить выполнения некоторого набора однокубитных (однокудитных) операций и одну двухкубитную управляемую перепутывающую операцию [3].

В то время как однокубитные и двухкубитные операции над фотонными кубитами на сегодняшний день хорошо разработаны, в области построения операций для многомерной кудитной логики существует множество открытых вопросов. В работах [4, 5] мы предложили метод реализации квантовых однокубитных вентилей в протоколе квантовой памяти, а также обобщили кубитные протоколы на системы более высокой размерности. В работах [6 - 8] нами был рассмотрен вопрос параллельной эволюции ансамбля двухкубитных систем. В данной работе мы фокусируемся на перепутывающих свойствах преобразования QND-поворот-QND. Также представлен анализ управляющих параметров, соответствующие наибольшим вероятностям двухкубитных операций.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 24-22-00004), и Фонда развития теоретической физики и математики. «БАЗИС» (Грант 22-1-4-20-1).

Список литературы

1. Barrett S.D., Kok P. Efficient high-fidelity quantum computation using matter qubits and linear optics // Physical Review A. 2005. V. 71. No. 6. P. 060310.

2. Gottesman D. Fault-tolerant quantum computation with higher-dimensional systems // NASA International Conference on Quantum Computing and Quantum Communications. Springer, Berlin, Heidelberg, 1998. P. 302-313.

3. Deutsch D.E., Barenco A., Ekert A. Universality in quantum computation // Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences. 1995. V. 449. No. 1937. P. 669-677.

4. Vashukevich E.A., Golubeva T.Y., Golubev Y.M. Conversion and storage of modes with orbital angular momentum in a quantum memory scheme // Physical Review A. 2020. V. 101. – No. 3. P. 033830.

5. Vashukevich E., Bashmakova E., Golubeva T.Y., Golubev Y.M. High-fidelity quantum gates for oam single qudits on quantum memory // Laser Physics Letters. 2022. V. 19. P. 025202.

6. Башмакова Е.Н., Вашукевич Е.А., Голубева Т.Ю. Параллельная многокубитная эволюция в протоколе квантового неразрушающего взаимодействия // Оптика и спектроскопия. 2023. Т. 131. № 7.

7. Bashmakova E.N., Vashukevich E.A., Golubeva T.Yu. Parallel multi-two-qubit swap gate via quantum nondemolition interaction of orbital-angular-momentum light and an atomic ensemble // Physical Review A. 2024. V. 109 (1). P. 012428.

8. Vashukevich E.A., Golubeva T.Yu. Parallel two-qubit entangling gates via a quantum nondemolition interaction controlled by rotation // Physical Review A, 2024. V. 110 (3). P. 032616.

УДК 535(06)+004(06)

А.П. ДУШАНИН[1,2], А.Н. ДАНИЛИН[1,3], Т.Р. ЮНУСОВ[1,2],
А.В. МАСАЛОВ[1,4], Д.А. ЧЕРМОШЕНЦЕВ[1,2,5], И.А. БИЛЕНКО[1,3]
[1]Российский квантовый центр, Сколково
[2]Московский физико-технически институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный
[3]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
[4]Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва
[5]Сколковский институт науки и технологий

ФАЗОВАЯ БИСТАБИЛЬНОСТЬ И СЖАТИЕ КВАНТОВЫХ ШУМОВ ВЫРОЖДЕННОГО ОПТИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ОСЦИЛЛЯТОРА В ИНТЕГРАЛЬНОМ РЕЗОНАТОРЕ С КУБИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ

Измерены снижение уровня шума ниже дробового и бистабильность фазы в надпороговом режиме вырожденного оптического параметрического осциллятора в интегральном кольцевом резонаторе с кубической нелинейностью с бихроматической накачкой. Для измерений использовался фазово-связанный локальный осциллятор.

A.P. DUSHANIN[1,2], A.N. DANILIN[1,3], T.R. YUNUSOV[1,2],
A.V. MASALOV[1,4], D.A. CHERMOSHENTSEV[1,2,5], I.A. BILENKO[1,3]
[1]Russian Quantum Center, Skolkovo
[2]Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny
[3]Lomonosov Moscow State University
[4]Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow
[5]Skolkovo Institute of Science and Technology

PHASE BISTABILITY AND QUANTUM NOISE SQUEEZING OF A DEGENERATE OPTICAL PARAMETRIC OSCILLATOR IN AN INTEGRATED RESONATOR WITH CUBIC NONLINEARITY

We measured a reduction in noise level below the shot noise limit and the phase bistability of a dual-pumped degenerate optical parametric oscillator in an integrated ring resonator with cubic nonlinearity. A phase-coupled local oscillator was used for the measurements.

Вырожденный оптический параметрический осциллятор (ВОПО) в интегральном кольцевом резонаторе с кубической нелинейностью может

использоваться в качестве основного элемента для когерентной машины Изинга [1] и источника сжатых состояний света [2].

В экспериментальной установке для получения и измерения ВОПО (рис. 1а) используются два лазера, излучающих на длинах волн локального осциллятора (1552 нм) и первой накачки (1549 нм). Вторая накачка (1555 нм) генерируется из излучения локального осциллятора и первой накачки в процессе четырёхволнового смешения в активной среде двухпроходного полупроводникового оптического усилителя (ДПОУ), что обеспечивает фазовую связанность ВОПО и локального осциллятора. Фаза локального осциллятора контролируется отстройками частот акустооптических модуляторов.

В ходе работы продемонстрировано фазово-бистабильное состояние ВОПО (рис. 1б) и сжатие квантовых шумов на 0.2 дБ (рис. 1в).

Работа поддержана компанией Росатом в рамках реализации Дорожной карты по квантовым вычислениям (контракт номер 868-1.3-15/15-2021 от 05.10.2021). Данилин А.Н. является стипендиатом Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

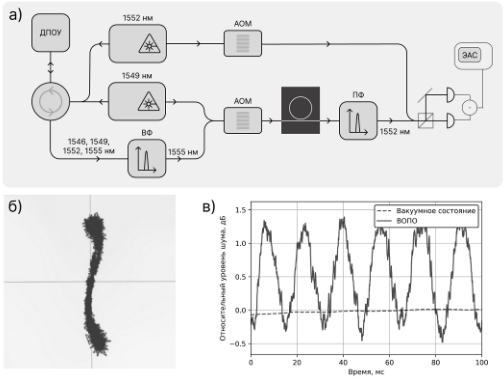


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. ВФ – полосовой волоконный фильтр, ПФ – пространственный фильтр, АОМ – акустооптический модулятор, ЭАС – электрический анализатор спектра (а). фазово-бистабильное состояние ВОПО на фазовой диаграмме вблизи порога генерации (б). уровень шума ВОПО и вакуумного состояния (в)

Список литературы

1. Marandi A., et al. Network of time-multiplexed optical parametric oscillators as a coherent Ising machine // Nature Photonics. 2014. V. 8. No. 12. P. 937-942.

2. Zhao Y., et al. Near-degenerate quadrature-squeezed vacuum generation on a silicon-nitride chip // Physical Review Letters. 2020. V. 124. No. 19. P. 193601.

УДК 535(06)+004(06)

А.Н. ДАРИНСКИЙ
Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова НИЦ «Курчатовский институт», Москва

НЕВЗАИМНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В МАГНИТООПТИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ

Теоретически исследуется влияние невзаимности на поверхностные электромагнитные волны (ПЭВ), распространяющиеся в магнитооптических структурах во взаимно противоположных направлениях, то есть на волны с тангенциальными волновыми числами k противоположного знака. Установлена корреляция между числом прямых ($k > 0$) и обратных ($k < 0$) ПЭВ, которая заключается в том. что максимальное общее число прямых и обратных ПЭВ меньше, чем удвоенное максимальное число ПЭВ для каждого из противоположных направлений, взятых отдельно.

A.N. DARINSKII
Shubnikov Institute of Crystallography of NRC «Kurchatov Institute», Moscow

NONRECIPROCAL PROPAGATION OF SURFACE ELECTROMAGNETIC WAVES IN MAGNETO-OPTICAL STRUCTURES

This work theoretically investigates the effect of nonreciprocity on surface electromagnetic waves (SEWs) propagating in magneto-optical structures in mutually opposite directions, i.e. on waves with tangential wave numbers k of opposite sign. A correlation has been established between the numbers of forward ($k > 0$) and backward ($k < 0$) propagating SEWs. It occurs that the peculiarity of this fact is that the maximum total number of forward and backward propagating SEWs is less than the doubled maximum number of SEWs for each of the opposite directions taken individually.

В работе обсуждается связь между существованием прямых и обратных поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ) в магнитооптически активных структурах. Принимая во внимание тот факт, что число ПЭВ в фиксированном направлении может отличаться от числа ПЭВ в обратном направлении, мы устанавливаем допустимый максимум общего числа ПЭВ, распространяющихся вперед и назад. Полученные результаты подробно изложены в [1].

Развитая теория основана на общих свойствах поверхностных электромагнитных импедансов сред, что даёт возможность делать выводы

без какой-либо привязки к конкретной кристаллографической симметрии и без явного решения краевой задачи ни аналитически, ни численно. Данный метод уже использовался нами для анализа существования ПЭВ общей поляризации в анизотропных и бианизотропных периодических структурах, на границе двух полубесконечных однородных сред [2 - 4], а также для анализа существования ТЕ и ТМ поляризованных плазмон-поляритонов (ППП) в металлических плёнках, граничащих со сверхрешётками [5]. Отметим, что используемые свойства импедансов выполняются при любой частотной дисперсии материальных констант при условии, что выполняются известные неравенства, обеспечивающие положительную определенность энергии электромагнитного поля.

В работе установлено соотношение между импедансами, относящимися к прямым и обратным ПЭВ. За счёт этого соотношения и удается выяснить максимальное общее число M_{tot} прямых и обратных ПЭВ. Другими словами, при заданном значении величины тангенциального волнового числа |k| число ПЭВ, распространяющихся в одном направлении, плюс число ПЭВ, распространяющихся в противоположном направлении, не может превосходить M_{tot}. Число M_{tot} может считаться характеристикой структуры, поскольку оно зависит от типа структуры и не зависит от значений материальных констант.

Было бы естественным ожидать, что $M_{tot} = 2M$, где M – максимальное допустимое число ПЭВ в одном направлении, причём M одинаково для прямого и обратного направления. Но в большинстве из рассмотренных в [1] структур $M_{tot} < 2M$. Например, на границе двух полубесконечных магнитооптических сред максимальное суммарное число прямых и обратных ПЭВ $M_{tot} = 2$ при заданном |k|, тогда как в каждом из взаимно противоположных направлений могут существовать две ПЭВ $M = M_{tot} = 2$. Для ППП в плёнке металла, помещённой между разными полубесконечными магнитооптически активными диэлектриками, M = 4, а $M_{tot} = 6$. Если плёнка будет магнитооптиически неактивным изотропным диэлектриком, тогда применительно к ПЭВ $M = M_{tot} = 4$. Это обусловлено разными знаками диэлектрической проницаемости металла и диэлектрика.

Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Список литературы

1. Darinskii A.N. // Phys. Rev. A. 2022. V. 106. P. 033513.
2. Darinskii A.N., Shuvalov A.L. // Phys. Rev. A. 2020. V. 102. P. 033515.
3. Darinskii A.N. // Phys. Rev. A. 2021. V. 103. P. 033501.
4. Darinskii A.N. // Phys. Rev. A. 2021. V. 104. P. 023507.
5. Даринский А.Н. // Кристаллография. 2024. Т. 69. С. 1018.

Д.А. БРЮКВИНА[1,2], Н.Ю. ДМИТРИЕВ[1], А.Е. ШИТИКОВ[1],
Д.А. ЧЕРМОШЕНЦЕВ[1,2,3], В.Е. ЛОБАНОВ[1], И.А. БИЛЕНКО[1,4]
[1]*Российский квантовый центр, Сколково*
[2]*Московский физико-технически институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный*
[3]*Сколковский институт науки и технологий*
[4]*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

АНАЛИЗ ВЕРОЯТНОСТИ СОЛИТОННЫХ СОСТОЯНИЙ В ИНТЕГРАЛЬНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ МИКРОРЕЗОНАТОРАХ

В данной работе представлены экспериментальный и численный анализ вероятности генерации различных солитонных состояний в высокодобротных интегральных оптических микрорезонаторах.

D.A. BRYUKVINA[1,2], N.Yu. DMITRIEV[1], A.E. SHITIKOV[1],
D.A. CHERMOSHENTSEV[1,2,3], V.E. LOBANOV[1], I.A. BILENKO[1,4]
[1]*Russian Quantum Center, Skolkovo*
[2]*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny*
[3]*Skolkovo Institute of Science and Technology*
[4]*Lomonosov Moscow State University*

ANALYSIS SOLITON STATES PROBABILITY IN INTEGRATED HIGH-Q MICRORING RESONATORS

This paper presents experimental and numerical analyses of the probability of generation of different soliton states in high-voltage integrated optical microresonators.

Оптические микрорезонаторы широко используются в современной оптике, поскольку благодаря сочетанию малых размеров и большой добротности становится возможным наблюдение различных нелинейных оптических эффектов [1], таких как генерация диссипативных солитонных структур. Однако, при генерации солитонов методом перестройки частоты накачки их количество является случайной величиной [2, 3], что усложняет их использование в прикладных задачах.

Целью данной работы является экспериментальное и численное исследование вероятности возникновения солитонных состояний (СС), отличающихся числом солитонов, в кольцевых интегральных микрорезонаторах в зависимости от коэффициента дисперсии групповых

скоростей (ДГС), мощности накачки и скорости перестройки частоты лазера накачки.

Экспериментально была получена статистика распределения СС для различных значений скорости перестройки, ДГС и мощности. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Экспериментально полученное распределение вероятности возбуждения различных СС приведено на рис. 2. В ходе эксперимента было показано, что рост мощности накачки увеличивает вероятность возбуждения одноСС ввиду достижения больших значений отстройки [2]. Также, экспериментально было продемонстрировано, что с ростом значения коэффициента ДГС микрорезонатора пороговая мощность для достижения одноСС снижается.

На основе уравнения Луджиато–Лефевра и было проведено численное моделирование для широкого диапазона параметров исследуемой системы. Было показано смещение вероятных СС в сторону одного солитона при увеличении ДГС или мощности, аналогично эксперименту.

Таким образом, в данной работе была исследована зависимость вероятности возникновения СС в кольцевых интегральных микрорезонаторах и найдены области с наибольшей вероятностью возбуждения односолитонных состояний.

Работа поддержана компанией Росатом в рамках реализации Дорожной карты по квантовым вычислениям (контракт № 868-1.3-15/15-2021 от 05.10.2021).

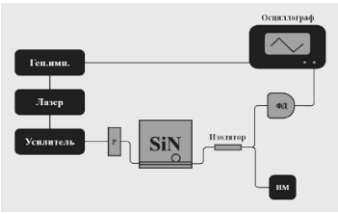


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: ФД – фотодетектор, ИМ – измеритель мощности, Р – контроллер поляризации

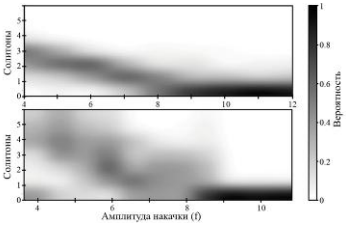


Рис. 2. Теоретическое распределение (А), экспериментальное распределение (Б) вероятности солитонных состояний

Список литературы

1. Городецкий М.Л. Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью. // М.: Физматлит, 2011.

2. Herr T. et al. Temporal solitons in optical microresonators // NPHOTON. 2013. P. 343.

3. Lobanov V., et al. Harmonization of chaos into a soliton in Kerr frequency combs // Optic Express. V. 24. No. 24.

УДК 535(06)+004(06)

А.А. СИЛИН, С.Б. КОРОЛЕВ
Санкт-Петербургский государственный университет

УНИВЕРСАЛЬНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ СЖАТЫХ СОСТОЯНИЙ ФОКА В N-МЕРНОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ В СХЕМЕ С ИЗМЕРЕНИЯМИ ЧИСЛА ЧАСТИЦ

Приведены результаты теоретического исследования возможности генерации сжатых состояний Фока в схеме с измерением числа частиц в многомодовом интерферометре. Удалось продемонстрировать, что можно подобрать параметры интерферометра и входных состояний света так, что при измерении любого числа частиц можно всегда генерировать сжатые состояния Фока. Было доказано, что генерируемое сжатое состояние Фока не зависит от распределения измеренного числа частиц, а зависит лишь от их суммы. Была исследована вероятность генерации таких состояний, а также их устойчивость к ошибкам измерений числа частиц.

A.A. SILIN, S.B. KOROLEV
Saint-Peterburg State University

UNIVERSAL GENERATION OF SQUEEZED FOCK STATES IN AN N-DIMENSIONAL INTERFEROMETER IN PARTICLE NUMBER MEASUREMENT SCHEME

Presents the results of a theoretical study on the possibility of creating squeezed Fock states using a particle number measurement in a multimode interferometer. It has been demonstrated that it is possible to choose the parameters of an interferometer and the initial states of light in such a way that, when measuring an arbitrary number of particles, a specific type of entangled state can always be produced. This state, known as a squeezed Fock state, does not depend on how many particles are measured, but only on the total number of particles in the system. The probability of producing such a state has been studied, as well as its resistance to errors in measuring the number of particles.

Негауссовы квантовые состояния необходимы во множестве квантово-информационных протоколах. Они используются в протоколах квантовой криптографии [1], квантовой метрологии [2]. Без негауссовых состояний невозможно построить квантовый компьютер. Негауссовы состояния необходимы в протоколах квантовой коррекции ошибок [3]. С их помощью можно закодировать квантовую информацию так, что она будет защищена от шумов в процессе хранения, передаче и преобразования. Сжатые состояния Фока (ССФ) являются примером хорошо изученных

негауссовых состояний, которые нашли своё применение в протоколах коррекции ошибок [4 - 5].

Целью представленной работы является теоретическое исследование возможности генерации ССФ в схемах с измерением числа частиц в N-1 моде N-модового интерферометра.

В работе было показано, что можно подобрать определённые параметры интерферометра и входных состояний света так, что при измерении любого числа частиц всегда на выходе схемы будут генерироваться ССФ. Более того полученное ССФ зависит лишь от общего числа измеренных фотонов, а не от того, в каком детекторе и сколько было измерено частиц.

Было найдено явное выражение для вероятности генерации ССФ. Показано, что вероятность генерации зависит от параметров интерферометра. Подбирая эти параметры, можно максимизировать вероятность генерации ССФ с различными номерами. Было показано, что существует компромисс между максимизацией вероятности генерации и усложнением схемы генерации.

Помимо этого, процесс генерации ССФ был исследован на устойчивость к ошибкам детектирования, определено аналитическое выражение верности состояний, на которые подействовала ошибка.

Практическая значимость исследования заключается не только в выявлении правил приготовления ССФ, но и в установлении нескольких фактов, удобных для экспериментальной реализации, а именно.

1) Увеличение количества входов схемы приводит к увеличению числа свободных параметров, что улучшает возможности для юстирования. Математическая вероятность генерации и верность состояний при этом не изменяются.

2) Фактическая вероятность генерации повышается, так как на данный момент детекторы имеют ограниченные возможности по регистрации нескольких фотонов (не более 8 фотонов), в любой схеме с измерением числа частиц максимальный возможный номер ССФ ограничен сверху количеством детекторов.

Список литературы

1. Lee J., Park J., Nha H. // Quantum Information. 2019. V. 5. P. 49.

2. Hou L.-L., Xu X.-F., et al. // Chinese Physics B. 2019. V. 28. P. 044203.

3. Korolev S.B., Bashmakova E.N., Golubeva T.Yu .// Quantum Information Processing. 2024. V. 23 (8). P. 1-16.

4. Bashmakova E.N., Korolev S.B., Golubeva T.Yu. // Phys. Lett. A. 2024. V. 526. P. 129964.

5. Korolev S.B., Bashmakova E.N., Golubeva T.Yu. // Laser Phys. Lett. 2024. V. 21. P. 095204.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. ЦУКАНОВ, И.Ю. КАТЕЕВ
Физико-технологический институт им. К.А. Валиева
НИЦ «Курчатовский институт», Москва

НАНОФОТОННЫЙ СВЕТОДЕЛИТЕЛЬ НА КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ С ФЁРСТЕРОВСКОЙ СВЯЗЬЮ

Предложена схема квантового светоделителя, преобразующего состояние пространственного фотонного кубита на двух модах за счёт обмена энергией между модами и квантовыми точками (КТ). Контролируя время взаимодействия, можно получить требуемую суперпозицию базисных однофотонных состояний кубита на выходе устройства. Кроме того, светоделитель позволяет генерировать запутанные двухфотонные NOON-состояния. Использование эффекта Фёрстера для управления обменом энергией между КТ даёт возможность увеличить межмодовое расстояние и подавить нежелательное прямое взаимодействие мод. В качестве примера был рассмотрен светоделитель на основе двумерного фотонного кристалла с температурной и структурной настройкой частот.

A.V. TSUKANOV, I.Yu. KATEEV
Valiev Institute of Physics and Technology of NRC «Kurchatov Institute», Moscow

NANOPHOTONIC BEAM-SPLITTER BASED ON QUANTUM DOTS WITH FÖRSTER COUPLING

A scheme of a quantum beam-splitter that transforms a state of a spatial photonic qubit based on two modes due to an energy exchange between the modes and quantum dots (QDs) is proposed. By controlling the interaction time, it is possible to obtain the required superposition of the basis single-photon states of the qubit at the output of the device. In addition, the beam-splitter allows the generation entangled two-photon NOON states. Using the Förster effect to control the energy exchange between the QDs makes it possible to increase the intermode distance and suppress the undesirable direct mode interaction. As an example, a beam-splitter based on a two-dimensional photonic crystal with a temperature and structural frequency tuning is considered.

Миниатюризация и рост качества изготовления позволяют интегрировать отдельные компоненты квантовых оптических сетей в уже существующие полупроводниковые устройства и платформы, созданные на базе микроэлектроники [1, 2]. Отдельный аспект, требующий всестороннего исследования, связан с тем, что с уменьшением геометрических размеров возрастает влияние квантовых эффектов на работу сети. В первую очередь оно обусловлено взаимодействием

одиночных фотонов или фотонных пар с квантовыми системами (атомами, молекулами, квантовыми точками, центрами окраски) [3].

В нашей работе мы рассмотрим светоделитель на основе структуры из квантовых точек (КТ), взаимодействующих с квантовыми полями мод волноводов (рис. 1). Одно- и двухфотонные состояния волноводов, проходя через данный элемент, преобразуются когерентным образом в заданное конечное состояние (произвольную однофотонную или запутанную двухфотонную суперпозиции их мод). Такой подход к дизайну светоделителя, в отличие от классического аналога, делает его более гибким и многофункциональным инструментом для работы с фотонами, задействованными в выполнении квантовых алгоритмов. Разработан алгоритм генерации запутанного двухфотонного NOON-состояния. Фёрстеровская связь электронов между КТ даёт возможность опосредовать взаимодействие мод и увеличить расстояние между ними. В качестве волноводов мы предлагаем использовать оптическую структуру на основе двумерного фотонного кристалла, где волноводы формируются из отсутствующих рядов отверстий в брэгговской решётке.

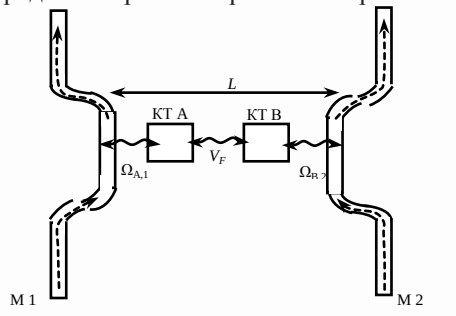


Рис. 1. Схема квантового светоделителя, представляющего собой два оптических волновода, моды которых взаимодействуют с двумя квантовыми точками, обмен энергией между квантовыми точками происходит за счёт взаимодействия Ферстера

Работа выполнена в рамках Государственного задания ФТИАН им. К.А. Валиева РАН Минобрнауки РФ по теме № FFNN-2022-0016 «Фундаментальные и прикладные исследования в области разработки методов высокоточного моделирования и контроля элементной базы квантовых компьютеров».

Список литературы

1. Dietrich C.P., Fiore A., et al. // Las. Photon. Rev. 2016. V. 10. P. 870.
2. Elshaari A.W., Pernice W., et al. // Nat. Photon. 2020. V. 14. P. 285.
3. Kim J.-H., Aghaeimeibodi S., et al. // Optica. 2020. V. 7. P. 291.

УДК 535(06)+004(06)

Н.И. ПЕТРОВ
Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

МОЛНИЯ КАК ЕСТЕСТВЕННЫЙ ИСТОЧНИК РЕНТГЕНОВСКИХ И ГАММА-ФОТОНОВ

Показано существование быстрых электромагнитных поверхностных плазмонных волн, распространяющихся вдоль искривленного канала молниевого разряда со скоростью, близкой к скорости света в вакууме. Это позволяет рассматривать канал молниевого разряда как ускоритель заряженных частиц, генерирующий микроволновое, рентгеновское, гамма и радиочастотное излучение импульсом тока, движущимся по спиральной траектории, с помощью механизмов синхротронного и циклотронного излучения.

N.I. PETROV
Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of RAS, Moscow

LIGHTNING AS A NATURAL SOURCE OF X-RAY AND GAMMA-RAY PHOTONS

The existence of fast electromagnetic surface plasmon waves propagating along the curved lightning discharge channel at a speed close to the speed of light in vacuum is shown. This makes it possible to consider the lightning discharge channel as a charged particle accelerator that generates microwave, X-ray, gamma-ray and RF emissions by a current pulse moving along a helical trajectory via synchrotron and cyclotron radiation mechanisms.

Молния – одно из самых энергетически мощных физических явлений в атмосфере. Недавно было обнаружено, что молния является источником земных гамма-вспышек – одного из самых мощных природных фотонных излучений на Земле. Механизм возникновения высокоэнергетического излучения молнией до сих пор неясен. Рентгеновское и γ-излучение, наблюдаемое при вспышках молний и длинных разрядах в атмосфере, обычно связывают с тормозным излучением убегающих электронов высокой энергии [1, 2]. Однако точный механизм, ответственный за образование электронов с высокой энергией, до конца не изучен. В настоящей работе, основанной на недавно опубликованных данных [3 - 5], объясняются эти результаты, и выдвигается утверждение, что наблюдаемое высокоэнергетическое излучение генерируется механизмом синхротронного излучения [6]. Современные теоретические модели

высокоэнергетического излучения молнии не могут объяснить обнаруженное излучение в диапазоне от 10 до 100 МэВ. Некоторые основные свойства, такие как спектр излучения, энергия отсечки, поляризация и характеристики излучения, всё ещё нуждаются в объяснении. Отметим, что предлагаемый механизм синхротронного излучения, в отличие от существующих моделей, не требует наличия крупномасштабной области электрического поля высокой интенсивности для ускорения электронов и затравочных частиц, необходимых для релятивистских процессов лавинообразного распространения убегающих электронов. На рис. 1 представлены зависимости скорости и длины распространения поверхностных плазмонных волн от частоты и проводимости канала. На рис. 2 представлены зависимости частоты и энергии фотонов от проводимости канала молнии, а также спектры излученных фотонов.

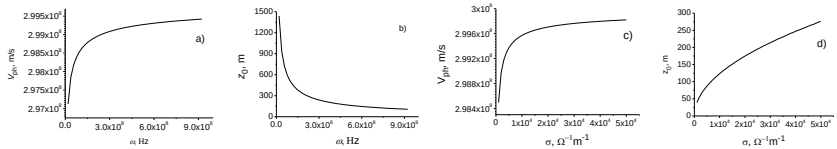
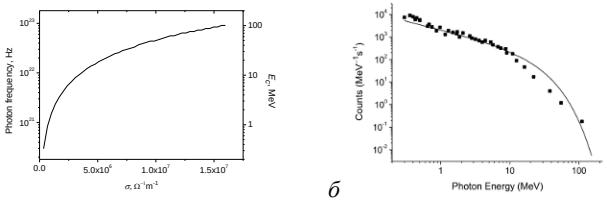


Рис. 1. Зависимости скорости (a, c) и длины распространения (b, d) от частоты (a, b), и проводимости канала (c, d): $\sigma = 10^4$ Ом$^{-1}$м$^{-1}$ (a, b); $\omega = 10^9$ Гц (c, d)



а *б*

Рис. 2. Частота и энергия фотонов как функция от проводимости канала: $\omega = 3.1 \cdot 10^9$ Гц (*а*), нормированный спектр фотонов (сплошная кривая) и измеренный спектр [3] (*б*)

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного задания FFNS-2022-0009.

Список литературы

1. Gurevich A.V., Milikh G.M., Roussel-Dupre R. // Phys. Lett. A. 1992. V. 165. P. 463-468.
2. Dwyer J.R., Smith D.M. // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. P. L22804.
3. Tavani M., Marisaldi M., Labanti C., et al. // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 106. P. 018501.
4. Hare B.M., Scholten O., Dwyer J., Ebert U., et al. // Phys. Rev. Lett. 2020. V. 124. P. 105101.
5. Kochkin P.O., Deursen A.P.J., Ebert U. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2015. V. 48. P. 025205.
6. Petrov N.I. // Sci. Rep. 2021. V. 11. P. 19824.

УДК 535(06)+004(06)

А.Р. БАГРОВ, Е.К. БАШКИРОВ
Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева

ДИНАМИКА ТЕПЛОВОГО ПЕРЕПУТЫВАНИЯ В НЕРЕЗОНАНСНОЙ ТРЁХКУБИТНОЙ МОДЕЛИ ТАВИСА-КАММИНГСА С КЕРРОВСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ ПОСРЕДСТВОМ МНОГОФОТОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Рассматривается динамика трёх идентичных кубитов, которые нерезонансно взаимодействуют с тепловым полем идеального резонатора со средой Керра посредством многофотонных процессов. Проведено численное моделирование для критерия отрицательности для различных начальных состояний кубитов и параметров модели. Результаты показали, что керровская нелинейность, расстройка и многофотонные процессы могут выступать в качестве эффективного механизма контроля критерия перепутывания кубитов в резонаторах.

A.R. BAGROV, E.K. BASHKIROV
Samara National Research University

DYNAMICS OF THERMAL ENTANGLEMENT IN THE NOT-RESONANT THREE-QUBIT TAVIS-CUMMINGS MODEL WITH KERR NONLINEARITY VIA MULTIPHOTON PROCESSES

The dynamics of three identical qubits that interact non-resonantly with the thermal field of an ideal resonator with a Kerr medium through multiphoton processes is considered. Numerical simulation has been performed for the negativity criterion for various initial states of qubits and model parameters. The results showed that Kerr nonlinearity, detuning and multiphoton processes can act as an effective mechanism for controlling the criterion of entanglement of qubits in resonators.

Исследования многокубитных перепутанных состояний является одной из приоритетных задач квантовой информатики [1, 2]. Перепутанные состояния естественных или искусственных атомов (кубитов) необходимы для функционирования таких квантовых устройств, как квантовые компьютеры, квантовые сети и другие. [3]. Изучение наиболее эффективных схем генерации, механизмов управления и контроля перепутанных состояний кубитов является, таким образом, одной из основных задач квантовой информатики. Для генерации перепутанных состояний обычно используют взаимодействие

естественных и искусственных атомов (нейтральных ридберговских атомов и ионов в ловушках, примесных спинов, квантовых точек, сверхпроводящих цепей, гибридных и оптомеханических систем) с электромагнитными полями резонаторов [4]. Для теоретического исследования динамики перепутывания состояний кубитов используют различные обобщения модели Джейнса-Каммингса [5]. Хотя общие свойства многокубитных перепутанных состояний изучены достаточно подробно, количественные критерии перепутывания удалось строго ввести только для двухкубитных систем. Анализ эволюции динамики перепутывания кубитов в данной работе проводился с помощью известного критерия Переса-Хородецких или критерия отрицательности [6].

Целью данной работы является исследование влияния расстройки, керровской нелинейности третьего порядка и многофотонных процессов на динамику перепутывания кубитов для различных начальных состояний кубитов.

Результаты компьютерного моделирования временной зависимости критерия отрицательности показали, что наличие расстройки и керровской нелинейности в случае начального сепарабельного состояния кубитов может приводить к существенному увеличению степени их перепутывания. В случае начального перепутанного состояния кубитов расстройка, керровская среда и многофотонные процессы могут значительно уменьшить амплитуды осцилляций Раби отрицательности и, соответственно, приводить к существенной стабилизации начального перепутывания кубитов. Нерезонансное взаимодействие и керровская среда могут также подавлять эффект мгновенной смерти перепутывания кубитов. Полученные результаты могут быть использованы в физике квантовых вычислений и квантовых коммуникаций.

Список литературы

1. Kendon V.M., Nemoto D., Munro W.J. // Journal of Modern Optics. 2002. V. 49 (10). P. 1709-1716.

2. Wendin G. // Reports on Progress in Physics. 2017. V. 80 (10). P. 106001.

3. Chen J. // Journal of Physics: Conference Series. 2021. V. 1865. P. 022008.

4. Gu X., et al. // Physics Reports. 2017. V. 718-719. P. 1-102.

5. Walther H., Varcoe B.T.H., Englert B.-G., Becker T. // Reports on Progress in Physics. 2011. V. 69 (5). P. 1325-1382.

6. Peres A. // Physics Review Letters. 1996. V. 77. P. 1413-1415.

УДК 535(06)+004(06)

О.А. ШУТОВА, В.Р. САДЫРОВА
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

СВЯЗЬ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕКТОРНЫХ ВИХРЕВЫХ ПУЧКОВ

Приведены результаты анализа связи между поляризационным параметром, введённым на основе обобщённых параметров Стокса, и орбитальными и спиновыми компонентами вектора Умова-Пойнтинга, рассчитанными для векторных остросфокусированных вихревых пучков. Векторные компоненты поля в пучке получены в рамках теории фокусировки Ричардса-Вольфа. Показана асимметрия между правой и левой поляризацией вихревых пучков.

O.A. SHOUTOVA, V.R. SADYROVA
Lomonosov Moscow State University

RELATION OF POLARIZATION AND ENERGY PROPERTIES OF VECTOR VORTEX BEAMS

The results of the analysis of the relationship between the polarization parameter introduced on the basis of generalized Stokes parameters and the orbital and spin components of the Poynting vector calculated for vector sharply focused vortex beams. The vector components of the field in the beam are obtained within the framework of the Richards-Wolf focusing theory. The asymmetry between the right and left polarization of vortex beams is shown.

Векторные вихревые пучки в последнее время привлекают всё больше внимания благодаря возросшим экспериментальным возможностям получения таких пучков с достаточно высокой интенсивностью для реализации нелинейных процессов, таких как генерация высоких гармоник (ГВГ). При этом возрастает необходимость и усложняется теоретическая задача точного описания их электродинамических свойств. Так как такие пучки могут нести как спиновый (СУМ), так и орбитальный (ОУМ) угловой момент, потоки энергии поля приобретают сложную конфигурацию в околофокальном объёме, что, в свою очередь, существенно сказывается на взаимодействии таких полей с веществом и оказывается востребовано в микроскопии сверхвысокого разрешения [1], лазерных ускорителях [2], спектроскопии высоких гармоник [3] а также в областях наблюдения и управления химическими реакциями [4].

Проводимое нами исследование посвящено описанию распределения поляризации, интенсивности и потоков энергии в сфокусированных вихревых пучках. Задача контролируемого получения вихревой компоненты в излучении высоких гармоник требует поиска пространственных мод для наиболее эффективного преобразования энергии падающего поля в ГВГ.

Пользуясь теорией Ричардса–Вольфа для фокусировки и обобщёнными параметрами Стокса [4, 5], мы показываем, как влияют на распределение потоков энергии направление вращения в вихре, порядок вихря, острота фокусировки, что позволяет оптимальным образом выбирать геометрию среды. В частности, наблюдается асимметрия между лево- и правополяризованными вихрями, что иногда ассоциируется с оптическим эффектом Холла (рис. 1 и 2).

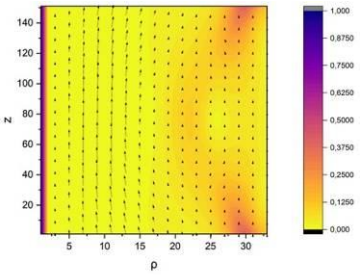


Рис. 1. Векторы ОУМ и распределение поляризационного параметра для правого вихря первого порядка

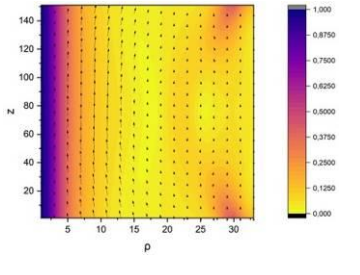


Рис. 2. Векторы ОУМ и распределение поляризационного параметра для левого вихря первого порядка

Список литературы

1. Yu W., Ji Z., et al. // Laser & Photonics Review. 2015. V. 147.
2. Miao B., Shrock J.E., et al. // Physical Review X. 2022. V. 12, P. 031038.
3. Troß J., Trallero-Herrero C.A. // J. Chem. Phys. 2019. V. 151. P. 084308.
4. Rehl B., Ma E., Parshotam Sh., et al. // J. Am. Chem. Soc. 2022. V. 144. No. 36. P. 16338-16349.
5. Sheppard C.J.R.. // Physical Review A. 2014. V. 90. P. 023809.
6. Andreev A.V., Shoutova O.A., Stremoukhov S.Yu., Trushin S.M. // JOSA A. V. 39. No. 7. P. 1775.

УДК 535(06)+004(06)

А.Р. ГАЗИЗОВ, Э.А. ИЗБАСАРОВА, М.С. ПУДОВКИН
Казанский (Приволжский) федеральный университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТА ПАРСЕЛЛА ОДИНОЧНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ В ГЕТЕРОПЛАЗМОННОМ НАНОРЕЗОНАТОРЕ

Плазмонные взаимодействия между соседними наночастицами благородных металлов (NPs) и/или подложкой способны вызывать существенное усиление локального электрического поля в области зазора, что открывает возможности для значительного увеличения интенсивности флуоресценции одиночных излучателей. В рамках данной работы проведено исследование влияния различных параметров на усиление флуоресценции в условиях плазмонного взаимодействия. Рассматриваемые факторы включают размеры и материалы металлических наночастиц, а также расстояние между ними. Установлено, что наночастицы Au@Ag демонстрируют наибольший эффект усиления флуоресценции. Кроме того, моделирование показало, что более крупные наночастицы Au@Ag обеспечивают более выраженное усиление флуоресценции по сравнению с их меньшими аналогами.

A.R. GAZIZOV, E.A. IZBASAROVA, M.S. PUDOVKIN
Kazan (Volga Region) Federal University

SIMULATION OF THE PURCELL EFFECT OF A SINGLE EMITTER IN A HETEROPLASMONIC NANOGAP

Plasmonic interactions between neighboring noble metal nanoparticles (NPs) and/or substrate can cause a significant increase in the local electric field in the gap region, which opens up opportunities for a significant increase in the fluorescence intensity of single emitters. Within the framework of this work, a systematic study of the effect of various parameters on fluorescence enhancement under plasmon interaction conditions was carried out. The factors considered include the size and materials of metal nanoparticles, as well as the distance between them. It was found that Au@Ag nanoparticles demonstrate the greatest effect of fluorescence enhancement. In addition, the simulation showed that larger Au@Ag nanoparticles provide a more pronounced fluorescence enhancement compared to their smaller counterparts.

Наночастицы благородных металлов (НЧ) привлекают значительное внимание исследователей благодаря своим уникальным оптическим свойствам и широкому спектру применения в различных научных и промышленных областях [1]. В частности, они демонстрируют

интересное явление, известное как локализованный поверхностный плазмонный резонанс (ЛППР) [2], которое является результатом коллективных колебаний электронов проводимости при взаимодействии с световым излучением. ЛППР металлических наночастиц зависит от таких факторов, как химический состав, морфология наночастиц и диэлектрическая среда, в которой они находятся, а также от взаимодействий между соседними металлическими наночастицами. ЛППР создает сильно локализованное электрическое поле вблизи поверхности наночастиц, что может существенно модифицировать оптические характеристики соседних излучателей. Существует множество сообщений об оптических эффектах, усиливающихся за счёт металлов, таких как поверхностное комбинационное рассеяние света (SERS), флуоресценция, усиленная металлом [3] и различные нелинейно-оптические эффекты [4 - 6].

Флуоресценция, усиливающаяся под воздействием металлов, стала новой и перспективной областью исследований, вызывающей большой интерес как в рамках фундаментальных научных исследований, так и в практических приложениях [3 ,7].

Моделирование было проведено с использованием численного метода FDTD (конечных разностей), также был проведён анализ эффекта Парселла для излучателя, находящегося в щели между поверхностями двух одинаковых или разнородных плазмонных материалов. Анализ показывает, что в нанорезонаторе из разнородных металлов Au@Ag происходит наибольшее усиление локального поля и фактор Парселла достигает максимальных значений среди рассматриваемых пар плазмонных материалов.

Данная работа финансировалась за счёт субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету по государственному заданию в сфере научной деятельности (FZSM-2022-0021).

Список литературы

1. Sau T.K., Rogach A.L., Jäckel F., et al. // Adv. Mater. 2010. V. 22. P. 1805-1825.
2. Ehrenreich H., Philipp H.R. // Phys. Rev. 1962. V. 128. P. 1622-1629.
3. Geddes C.D., Lakowicz J.R. // J. Fluoresc. 2002. V. 12. P. 121-129.
4. Deng W., Goldys E.M. // Langmuir. 2012. V. 28. P. 10152-10163.
5. Dou X., Chung P.-Y., Jiang P., Dai J. // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 100. P. 041116.
6. Husaini S., Teng H., Menon V.M. // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 101. P. 111103.
7. Eustis S., El-Sayed M.A. // Chem. Soc. Rev. 2006. V. 35. P. 209-217.

Р. СИНГХ[1], А.Е. ТЕРЕТЁНКОВ[2]
[1]*Независимый исследователь, Домодедово*
[2]*Математический институт им. В.А. Стеклова РАН, Москва*

ФОРМИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЙ, ПОДОБНЫХ СОСТОЯНИЯМ КОТОВ ШРЕДИНГЕРА С ПОМОЩЬЮ РДС-КРИСТАЛЛА

Исследовано формирование состояний, подобных состояниям котов Шредингера в процессе спонтанного параметрического рассеяния в РДС-кристалле, когда мода накачки считается квантовой и истощается. Состояние котов Шредингера формируется в модах основной и второй гармоник при определенных начальных состояниях и длинах взаимодействия. Функция Вигнера используется для качественной визуализации состояний котов Шредингера.

R. SINGH[1], A.E. TERETENKOV[2]
[1]*Independent researcher, Domodedovo*
[2]*Steklov Mathematical Institute of the RAS, Moscow*

THE FORMATION OF SCHRODINGER'S CAT-LIKE STATES IN A PPNC CRYSTAL

The formation of Schrodinger cat-like states in the process of spontaneous parametric down-conversion in a PPNC crystal, when the pump mode is considered to be quantum and depleted, is investigated. For certain initial states and interaction lengths, Schrodinger cat-like states are formed in the fundamental and second harmonic modes. The Schrodinger cat-like states are visualized qualitatively using the Wigner function.

Обычно нелинейные процессы в квантовой нелинейной оптике изучались с помощью метода приближения заданного поля, то есть с помощью полуклассического метода. В этом методе гамильтониан взаимодействия для процесса параметрического преобразования на основе квадратичной нелинейности, который является кубическим, аппроксимируется квадратичным. Такая аппроксимация пренебрегает особенностями негауссовости (отрицательное значение функции Вигнера), присутствующими в исходной кубической форме гамильтониана взаимодействия. Для полного учёта квантовых эффектов, присутствующих во всех модах процесса спонтанного параметрического рассеяния (СПР) может быть применён другой метод аппроксимации,

например, разложение унитарных операторов. Такой метод аппроксимации хорошо согласуется на очень ранних стадиях эволюции и начинает отклоняться на более поздних стадиях. Однако, метод диагонализации может быть использован для изучения эволюции при больших длинах взаимодействия без потери квантовых эффектов, присутствующих во взаимодействующих модах.

В данной работе мы впервые изучили формирование состояний типа кота Шредингера, когда обе моды (фундаментальная и вторая гармоника) считаются квантованными и истощаются при эффективной реализации СПР-процесса на основе $\chi^{(2)}$. С помощью метода диагонализации численно находятся собственные значения и соответствующие собственные векторы гамильтониана взаимодействия, ответственного за СПР-процесс. С помощью функции Вигнера изучено и качественно проиллюстрировано образование состояний, подобных коту Шредингера. Состояния, подобные котам Шредингера, наблюдаются в фундаментальной и второй гармонической модах в случае, когда фундаментальная мода находится в состоянии вакуума, а вторая, гармоническая - в когерентном состоянии (рис. 1).

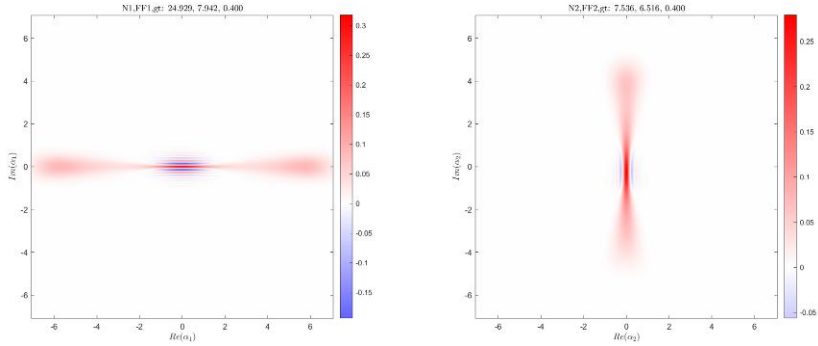


Рис. 1. Формирования состояний, подобных котам Шредингера на частотах основной и второй гармонике при реализации СПР-процесса в РДС-кристалле

Список литературы

1. Singh R., Teretenkov A.E. The formation of non-Gaussian states in the process of parametric down-conversion // arXiv preprint arXiv:2405.14526. 2024.

2. Nikitin S.P., Masalov A.V. // Quantum Opt. 1991. V. 3. P, 105.

УДК 535(06)+004(06)

А.П. ВЛАДИМИРОВ[1,2], П.В. ПАВЛОВ[3]
[1]*Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург*
[2]*Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, Екатеринбург*
[3]*Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, Воронеж*

К ВОПРОСУ О СОЗДАНИИ НОВЫХ МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Обсуждаются результаты применения новой ширографии для выявления механизмов усталостной деградации ряда материалов при мало-, много-, и гигацикловой усталости. Для контроля необратимых процессов и оценки остаточного ресурса элементов конструкций предлагается использовать методы контроля нового поколения, основанные на использовании датчиков матричного типа с размерами ячеек порядка 10 мкм.

A.P. VLADIMIROV[1,2], P.V. PAVLOV[3]
[1]*Institute of Engineering Science of the UB RAS, Yekaterinburg*
[2]*Ural Federal University named after B.N. Yeltsin, Yekaterinburg*
[3]*Air Forces Academy named after Prof. N.E. Zhukovskiy and Yu.A. Gagarin, Voronezh*

TO THE QUESTION OF CREATING NEW METHODS AND DEVICES FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING AND TECHNICAL DIAGNOSTICS

The results of using new shearography to identify mechanisms of fatigue degradation of a number of materials under low-, high-, and giga-cycle fatigue are discussed. To control irreversible processes and assess the residual life of structural elements, it is proposed to use new generation control methods based on the use of matrix-type sensors with cell sizes of about 10 μm.

Согласно разным литературным источникам, 90 % деталей техники разрушаются вследствие усталости материалов, из них до 80 % – вследствие многоцикловой усталости. Однако, до последнего времени отсутствовали простые и надежные методы контроля, позволяющие в режиме реального времени количественно оценивать необратимые деформации и повреждения, возникающие при многоцикловой усталости. Следствием отсутствия понимания механизмов усталости является создание тяжёлых и габаритных объектов, дорогостоящих испытательных комплексов и большие временные затраты на ввод изделий в

эксплуатацию. После обнаружения нового механооптического эффекта [1], создания на его основе оптического метода определения деформаций на минимальной базе порядка 1 мкм [2 - 5] и выявления с его помощью механизмов многоцикловой усталости [6], ситуация может кардинально измениться. В [7] показано, что новый оптический метод определения деформаций (новая ширография) по чувствительности и пространственному разрешению на два порядка превосходит старый сдвиговый вариант корреляционный спекл-интерферометрии, получивший название shearography (shear переводится как сдвиг). На основе полученных данных в [8] обсуждаются перспективы создания оптических и неоптических методов неразрушающего контроля и технической диагностики нового поколения, основанных на использовании датчиков матричного типа с размерами ячеек порядка 10 мкм. Датчики привычных размеров порядка 1 – 100 мм можно собирать из матриц меньших размеров. Тогда, зная предельные значения физических величин, соответствующих зарождению трещины, контролируя скорость изменения этих величин, можно оценить время до старта трещины. В [9] рассмотрены первые шаги, предпринятые в разработке указанных датчиков, в [10] – в разработке метода расчёта ресурса деталей, учитывающего полученные данные, а в [11] – по применению метода в дефектоскопии авиационной техники.

Список литературы

1. Vladimirov A.P. // Proc. Of 10th International Conference on Vibration Measurements by Laser and Noncontact Techniques –AIVELA 2012. 2012. V. 1457. P. 459-468.

2. Vladimirov A.P. // Opt. Engineering. 2016. V. 55. No. 12. P. 121727.

3. Vladimirov A.P. // AIP Conference Proceedings. 2016. V. 1740. P. 040004.

4. Владимиров А.П. // Известия вузов. Радиофизика. 2020. Т. 63. № 8. С 655-664.

5. Владимиров А.П. и др. // Труды XVI Международной научно-технической конференции. М.: Издательство «Перо». 2021. С. 51-62.

6. Владимиров А.П. // Сетевой электронный научный журнал. 2023. Т. 10. № 4. С. 3-7.

7. Владимиров А.П. и др. // Оптика и спектроскопия. 2019. Т. 127. Вып. 5. С. 870-880.

8. Владимиров А.П. // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2024. Т. 11. № 3. С. 73-77.

9. Vladimirov A.P., and et al. // Proc. of IEEE Xplore: 2024 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). 2024. P. 205-209.

10. Владимиров А.П., Коновалов А.В. // Математическое моделирование в естественных науках: материалы XXXIII Всероссийской конференции. Пермь: ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». 2024. С. 91-94.

11. Pavlov P.V., Vladimirov A.P. // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2024. V. 5. P. 195-207.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. БУЛДАКОВА, М.И. ШАРИПОВА, В.В. ТОЛМАЧЕВА,
А.Ю. ФРОЛОВ, А.А. ФЕДЯНИН
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

РАЗРАБОТКА ПЕРЕСТРАИВАЕМЫХ ОПТИЧЕСКИХ МИКРОУСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ФОТОПОЛИМЕРА С МАГНИТНЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ

Приведены результаты разработки и изготовления активных дифракционных решёток с помощью технологии двухфотонной литографии. Для данной задачи были разработаны трёхмерные модели дифракционных решёток и магнитно-фотополимерные композиты нескольких видов. Изготовленные структуры демонстрировали наличие дифракционной картины и деформировались при приложении внешнего магнитного поля.

A.V. BULDAKOVA, M.I. SHARIPOVA, V.V. TOLMACHEVA,
A.Yu. FROLOV, A.A. FEDYANIN
Lomonosov Moscow State University

DEVELOPMENT OF RECONFIGURABLE OPTICAL MICRODEVICES BASED ON PHOTOPOLYMER WITH MAGNETIC NANOPARTICLES

The results of the development and fabrication of active diffraction gratings using two-photon lithography are presented. For this purpose, three-dimensional models of diffraction gratings and several types of magneto-photopolymer composites were developed. The fabricated structures have demonstrated the presence of a diffraction pattern and have deformed by application of an external magnetic field.

Микроструктуры с различными функциональностями, изготовленные с помощью технологии двухфотонной литографии (ТДЛ), являются перспективными при создании микромеханических и микрооптических элементов [1, 2]. Однако структуры, изготовленные данной технологией, ограничены в применении своей неактивностью к внешним воздействиям. Внедрение магнитных наночастиц позволяет сделать микроустройства активными к внешнему магнитному полю [3, 4].

Целью работы является разработка перестраиваемой дифракционной решётки на основе фотополимера с магнитным наночастицами, с перспективой её дальнейшего использования в качестве оптического модулятора. Для создания активных дифракционных решёток были

разработаны несколько комбинаций соединений, состоящих из фотополимеров SU-8, SZ-2080 и Ormocomp и наночастиц Fe_3O_4 (средний диаметр 16 нм). Для предотвращения агломерации наночастиц использовались поверхностно-активные вещества – олеиновая кислота и поливинилпирролидон, а также растворители – толуол и этанол для смешивания их с фотополимерами. Для изготовления решёток были разработаны трёхмерные модели (рис. 1а). Первая модель состоит из зигзагообразных полос длиной 27 мкм, толщиной 1 мкм и периодом 3 мкм. Вторая модель представляет собой объёмную спираль диаметром 14 мкм с толщиной спирали 1 мкм и периодом 4 мкм.

Итоговый состав магнитного фотополимерного композита, обеспечивающий равномерное распределение наночастиц, магнитный отклик и гибкость структур (рис. 1г, д), включал фотополимер SZ-2080, наночастицы Fe_3O_4, толуол и олеиновую кислоту. Напечатанные дифракционные решётки с концентрациями наночастиц Fe_3O_4 0,5 % - 3 % по массе (рис. 1б, в) имели дифракционные порядки на углах 20 и 45 °, что соответствовало теоретическим расчётам. Структуры с концентрациями 2 - 3 % успешно реагировали на приложение магнитного поля – растягиваясь и отклоняясь от своего начального положения.

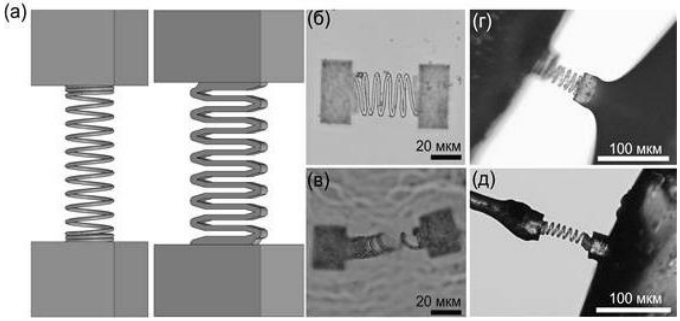


Рис. 1. Трёхмерные модели, изготавливаемых решёток (а); изображения с оптического микроскопа напечатанной решётки в виде первой (б, г) и второй модели (в, д)

Список литературы

1. Balazs A.C., Emrick T., et al. // Science. 2006. V. 314. P. 1107-1110.
2. Xing J.F., Zheng M.L., et al. // Chemical Society Reviews. 2015. V. 44. P. 5031-5039.
3. Lin C.L., et al. // Microfluidics and BioMEMS, 2015. V. 9320. P. 90-98.
4. Wang J., et al. // Optics letters. 2009. V. 34. P. 581-583.

УДК 535(06)+004(06)

А.А. БУРЦЕВ[1], В.В. ИОНИН[1], А.В. КИСЕЛЕВ[1], Н.Н. ЕЛИСЕЕВ[1], В.А. МИХАЛЕВСКИЙ[1], А.А. НЕВЗОРОВ[1,2], В.В. ГРЕБЕНЕВ[1], А.А. ЛОТИН[1,3]

[1]Институт проблем лазерных и информационных технологий НИЦ «Курчатовский институт». Шатура
[2]Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва
[3]Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва

ВЫСОКОПРОЗРАЧНЫЕ ФАЗОИЗМЕНЯЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СЕЛЕНА ДЛЯ РЕКОНФИГУРИРУЕМОЙ ФОТОНИКИ

В работе представлены исследования контраста физических свойств тонких плёнок высокопрозрачных халькогенидных материалов $Ge_2Sb_2Se_4Te_1$, Sb_2Se_3 и Bi_2Se_3. Анализируются особенности кристаллизации при нагреве и изменение структурных свойств.

A.A. BURTSEV[1], V.V. IONIN[1], A.V. KISELEV[1], N.N. ELISEEV[1], V.A. MIKHALEVSKY[1], A.A. NEVZOROV[1,2], V.V. GREBENEV[1], A.A. LOTIN[1,3]

[1]Institute on Laser and Information Technologies of NRC «Kurchatov Institute», Shatura
[2]National University of Science and Technology MISIS, Moscow
[3]Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow

HIGH TRANSPARENT PHASE-CHANGE MATERIALS BASED ON SELENIUM FOR RECONFIGURABLE PHOTONICS

The paper presents studies of the contrast of physical properties of thin films of high transparent chalcogenide materials $Ge_2Sb_2Se_4Te_1$, Sb_2Se_3 and Bi_2Se_3. The specific features of crystallization upon heating and changes in structural properties are analyzed.

Фазоизменяемые материалы (ФИМ) – идеальные кандидаты для полностью оптических устройств хранения и обработки информации. Они уже были предметом интенсивных исследований и разработок в течение последнего десятилетия, но в контексте электронных модулей памяти и оптических дисков высокой плотности записи. Яркой и функциональной особенностью этих материалов является высокий контраст между

кристаллической и аморфной фазами как по их электрическим, так и по оптическим свойствам [1].

С развитием литографии и исследовании халькогенидных соединений, ФИМ, в первую очередь линии Ge-Sb-Te (GST) стали важным кандидатом в области создания электронных энергонезависимых устройств памяти следующего поколения [2, 3]. Тем не менее, нельзя не отметить, что долгое время ФИМ семейства Ge-Sb-Te в основном оптимизировались для использования в электронных устройствах памяти (PCRAM) [4]. В последние годы всё больше усилий уделяется поиску и исследованию новых семейств ФИМ с большим изменением оптических констант. Благодаря низким потерям и высокому показателю преломления материалы, содержащие серу и селен, представляют особый интерес для применения в ближней инфракрасной области [5, 6]. Примером новых материалов могут служить также сплавы Ge-Sb-Te, легированные селеном [7, 8]. Для того чтобы получить полную картину структурных превращений и изменения свойств ФИМ, необходим комплексный подход к их изучению. Помимо комплексного исследования, необходимо сравнить различные материалы, чтобы выбрать наиболее оптимальный для конкретного применения (например, реконфигурируемый модулятор или поглотитель).

Целью настоящей работы является комплексное исследование контраста свойств аморфной и кристаллической фаз материалов $Ge_2Sb_2Se_4Te_1$, Sb_2Se_3 и Bi_2Se_3, а также анализ кинетики фазового перехода и изменения структурных свойств [9]. Большинство технологических приложений требуют систематического анализа свойств материалов для определения наиболее подходящего материала.

Список литературы

1. Wuttig M., et al. // Nature photonics. 2017. V. 11. No. 8. P. 465-476.
2. Li Y., et al. // Journal of Physics D: Applied Physics. 2018. V. 51. No. 50. P. 503002.
3. Zhang W., Mazzarello R., Wuttig M., et al. // Nat. Rev. Mater. 2019. V. 4. P. 150-168.
4. Sarwat S.G.. // Materials science and technology. 2017. V. 33. No. 16. P. 1890-1906.
5. Delaney M., et al. // Advanced Functional Materials. 2020. V. 30. No. 36. P. 2002447.
6. Biegański A., et al. // Optical Materials Express. V. 14. No. 4. P. 862-870.
7. Burtsev A.A., et al. // Materials Science in Semiconductor Processing. 2022. V. 150. P. 106907.
8. Zhang Y., et al. // Nature Communications. 2019. V. 10. No. 1. P. 1-9.
9. Burtsev A.A., et al. // Optical Materials. 2024. V. 157. P. 116117.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. КОЛЧИН, Д.В. ШУЛЕЙКО[1], С.В. ЗАБОТНОВ[1],
Л.А. ГОЛОВАНЬ[1], С.А. КОЗЮХИН, П.К. КАШКАРОВ[1]
Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва
[1]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ОПТИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ ФАЗОПЕРЕМЕННЫХ ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ ТОНКИХ ПЛЁНОК, ОБУСЛОВЛЕННАЯ ФЕМТОСЕКУНДНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование взаимодействия между фазопеременными халькогенидных тонкими плёнками и фемтосекундным лазерным излучением. Определена природа наблюдаемой искусственной оптической анизотропии в диапазоне около телекоммуникационной длины волны 1550 нм.

A.V. KOLCHIN, D.V. SHULEIKO[1], S.V. ZABOTNOV[1],
L.A. GOLOVAN[1], S.A. KOZYUKHIN, P.K. KASHKAROV[1]
Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the RAS, Moscow
[1]Lomonosov Moscow State University

OPTICAL ANISOTROPY OF PHASE-CHANGED CHALCOGENIDE THIN FILMS, CAUSED BY FEMTOSECOND LASER TREATMENT

Femtosecond laser treatment of phase-changed chalcogenide thin films was investigated via several experimental and theoretical methodics. The nature of observed optical anisotropy in C-band was explained.

Фемтосекундная лазерная модификация успела зарекомендовать себя в качестве эффективного способа усовершенствования оптических свойств тонких плёнок и микроструктур [1]. Не являются исключением слои халькогенидного фазопеременного полупроводника $Ge_2Sb_2Te_5$ (GST225) [2]. В частности, это может быть достижимо вследствие того, что при обратимых фазовых переходах воздействие фемтосекундыми лазерными импульсами сопровождается формирование лазерно-индуцированных поверхностных периодических структур (ЛИППС).

Образцы аморфных тонких плёнок GST225 с толщиной 130 - 200 нм были осаждены на диэлектрические подложки путём магнетронного распыления поликристаллической мишени. Последующее облучение

фемтосекундными лазерными импульсами (длительность 135 фс, длина волны 1250 нм, частота следования 10 Гц, плотность энергии 0.1 Дж/см^2) было осуществлено в сканирующем режиме. Морфология и фазовый состав как исходных, так и облучённых плёнок были изучены с помощью оптической (ОМ), атомно-силовой (АСМ), растровой электронной микроскопии (РЭМ), рентгеновской дифракции, и спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) В свою очередь, оптические свойства были исследованы с помощью инфракрасной (ИК) спектроскопии. Теоретическое описание было проведено в рамках двухтемпературной модели [3], теории Бонзе–Сайпа–Друде [4] и приближения эффективной среды [5].

Обнаружено, что формирование волновых ЛИППС сопровождалось процессами кристаллизации, в то время как субволновых – обратным процессом в виде аморфизации. Теоретические вычисления показали взаимосвязь наблюдаемых изменений морфологии поверхности и фазового состава с использованными параметрами фемтосекундной лазерной модификации.

Облучённые образцы аморфных тонких плёнок GST225 продемонстрировали наличие оптической анизотропии в диапазоне длин волн 1350 - 1700 нм. Моделирование оптического отражения свидетельствует в пользу того, что обнаруженная анизотропия обусловлена чередованием аморфных и кристаллических плоскостей с периодом около 1 мкм.

Таким образом, результаты проведённого комплексного исследования открывают широкие перспективы в контексте повышения эффективности применения халькогенидного полупроводника GST225 в приложениях перезаписываемой памяти и реконфигурируемой нанофотоники.

Список литературы

1. Chen M.Q., et al. // Optics & Laser Technol. 2022. V. 147. P. 107628.
2. Заботнов С.В. и др. // Российские нанотехнологии. 2023. Т. 18 (6). С. 723-736.
3. Alexopoulou V.E., Markopoulos A.P. // Arch. Computat. Methods Eng. 2024. V. 31. P. 93-123.
4. Höhm S., et al. // J. Appl. Phys. 2012. V. 112 (1). P. 014901.
5. Bergman D.J. // Phys. Rep. 1978. V. 43. P. 27-32.

УДК 535(06)+004(06)

Д.П. СУДАС, П.И. КУЗНЕЦОВ
Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

ОТЖИГ НАНОПОКРЫТИЙ ОКСИДА ВАНАДИЯ СО СТРУКТУРНЫМ ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ

В настоящей работе проведено исследование процесса осаждения оксидов ванадия ряда Магнелли из изопропоксида ванадила методом химического парофазного осаждения из металлорганических соединений. Такой метод для выбранного прекурсора применялся впервые. Покрытия толщиной до 100 нм наносились при температурах от 160 до 290 °С на плоскопаралельные пластины из кварцевого стекла, сапфира и кремния. Синтез проводили в два этапа: на первом осаждали в атмосфере аргона, а на втором отжигали при более высоких температурах в водородной среде. Для оценки состава и свойств получаемых материалов использовали спектры пропускания, комбинационного рассеяния, а также метод рентгеноструктурного анализа.

D.P. SUDAS, P.I. KUZNETSOV
Fryazino branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS

ANNEALING OF VANADIUM OXIDE NANOCOATINGS WITH STRUCTURAL PHASE TRANSITION

In this paper, we study the process of deposition of vanadium oxides of the Magnelli series from vanadyl tri-isopropoxide by the method of chemical vapor deposition from organometallic compounds. This method was used for the first time for the selected precursor. Coatings up to 100 nm thick were applied at temperatures from 160 to 290 °C onto plane-parallel plates made of quartz glass, sapphire and silicon. The synthesis was carried out in two stages: in the first, they were deposited in an argon atmosphere, and in the second, they were annealed at higher temperatures in a hydrogen environment. To assess the composition and properties of the resulting materials, we used transmission spectra, Raman scattering, and X-ray structural analysis.

Материалы способные менять свои оптические и электрические свойства в зависимости от условий окружающей среды активно используются в науке и технике в настоящий момент [1 - 3]. При достижении некоторой критической температуры материал меняет свою структуру и претерпевает переход, сопровождающийся перестройкой кристаллической решётки. Индуцированный температурой электронный переход активирует структурный, что сопровождается изменением

электрического сопротивления и оптического отражения. Кроме того, данный переход для разных веществ наблюдается при разных температурах от криогенных до комнатных и выше. Например, оксид ванадия VO_2 имеет переход при 68 °C, а V_2O_3 при 133 °C. Такие оксиды активно используйся в элементах памяти, оптических фильтрах и затворах. При этом величина изменения сопротивления зависит от равномерности материала, его стехиометричности и морфологии, которые существенно отличается от прекурсора и метода синтеза требуемого оксида.

Полученные результаты (рис. 1 и 2) дают исчерпывающие данные об условиях получения оксидов ванадия ряда Магнелли из изопропоксида ванадила. Оценка экспериментальных данных позволила заключить, что для восстановления из высшего оксида V_2O_5 до низших самым важным параметром является температура отжига, а не его время. Кроме того, для использованных толщин покрытий характерен процесс преобразование по всему объёму синтезированного оксида ванадия. При этом, если процесс восстановления проводился не сразу после осаждения, а после контакта образца с воздухом, то скачок проводимости был не такой заметный. Максимальный перепад сопротивления при фазовом переходе составил четыре порядка для VO_2 при 65 °C.

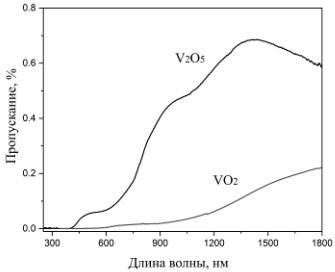


Рис. 1. Спектры пропускания в видимом диапазоне длин волн

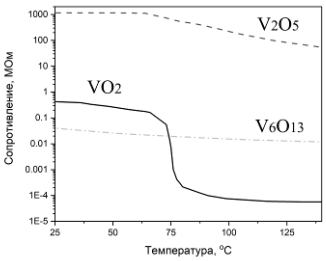


Рис. 2. Изменение электросопротивления при разных температурах отжига

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (№ 075-01110-23-01).

Список литературы

1. Lee S., et al. // Scientific reports. 2016. V. 6. No. 1, P. 19621.
2. Huotari J., et al. // Journal of Alloys and Compounds. 2016. V. 675, P. 433.
3. Perminov V.V., et al. // IOP Publishing. 2017. V. 929. No. 1. P. 012045.

П.А. МАКАРОВ
Физико-математический институт ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар

РАСЧЁТ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ НЕОДНОРОДНЫХ СЛОИСТЫХ СТРУКТУР

Разработана методика вычисления коэффициентов отражения, прохождения и поглощения электромагнитной энергии плоскополяризованных монохроматических волн в многокомпонентных неоднородных слоистых структурах. С помощью данной методики определены размерные, частотные и угловые зависимости соответствующих коэффициентов для перпендикулярных и продольных поляризаций структур различных составов. Определены границы применимости метода.

P.A. MAKAROV
Institute of Physics and Mathematics FRC Komi SC of Ural Branch of the RAS, Syktyvkar

CALCULATION OF OPTICAL CHARACTERISTICS OF MULTICOMPONENT INHOMOGENEOUS LAYERED STRUCTURES

A technique for calculating the reflection, transmission, and absorption coefficients of electromagnetic energy of plane-polarized monochromatic waves in multicomponent inhomogeneous layered structures has been developed. With the help of this technique the dimensional, frequency and angular dependencies of the corresponding coefficients for perpendicular and longitudinal polarizations of structures of different compositions are studied. The limits of applicability of the method are determined.

Изучение отражающих и пропускающих свойств различных низкоразмерных систем: тонких плёнок, многослойных и композитных структур является одним из важнейших направлений современной оптики, радиофизики и фотоники. Неоднородные многокомпонентные плёночные системы проявляют разнообразные электрические [1, 2] и магнитные [3, 4] свойства, так как особенности микро- и наноструктуры подобных объектов непосредственно обусловливают их материальные параметры (диэлектрическую, магнитную проницаемость и проводимость). Вместе с материальными параметрами формируются такие дифференциальные и интегральные характеристики данных структур, как отражение, прохождение и поглощение электромагнитных

волн различных спектральных диапазонов [1 - 6]. Это потенциально позволяет использовать данные плёночные системы в качестве различных функциональных устройств фотоники: селективных фильтров, управляемых поляризаторов, резонаторов, монохроматоров и других устройств.

Целью данной работы является разработка и апробация эффективного расчётного метода для определения отражающих, пропускающих и поглощающих характеристик многокомпонентных неоднородных слоистых структур. Неоднородность при этом понимается в двух смыслах: в первую очередь в расчётную модель закладывается слоистый характер структуры, а кроме того учитывается неоднородность самих слоёв на более мелком пространственном масштабе. Влияние первого типа неоднородности в данной работе учитывается аналитически с помощью рекуррентного метода расчёта [7], в то время как мелкомасштабная неоднородность моделируется согласно теории эффективной среды в приближениях Максвелла–Гарнетта и Полдера–ван Сантена [8].

Метод, разработанный в рамках данного исследования, устойчиво работает с приемлемой точностью для расчёта размерных, частотных и угловых зависимостей коэффициентов отражения, прохождения и поглощения многослойных структур, которые можно считать слабо поглощающими, то есть в тех случаях, когда мала проводимость слоёв. Для анализа результатов расчётов тестировались системы размера вплоть до нескольких сотен слоёв. Кроме того, утверждается, что алгоритм даёт физически корректные результаты и для сильно поглощающих структур, но только в том случае, когда сильно поглощающий слой — единственный в системе.

Список литературы

1. Перевалов Т.В., Гриценко В.А. // УФН. 2010. Т. 180 (6). С. 587-603.
2. Антонец И.В., и др. // ЖТФ. 2010. Т. 80 (9). С. 134-140.
3. de Cos D., et al. // JMMM. V. 304. P. 218-221.
4. Бузников Н.А. и др. // ЖТФ. 2004.Т. 74 (5). С. 56-61.
5. Курин В.В. // УФН. 2009. Т. 179 (9). С. 1012-1018.
6. Усанов Д.А., и др. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33 (2). С. 13-22.
7. Макаров П.А. // Вестник Сыкт. унив. Серия 1: Математика. Механика. Информатика. 2016. Вып. 1 (21). С. 9-27.
8. Макаров П.А. Дис. к.ф.-м.н. Челябинск: Челяб. гос. унив., 2012.

УДК 535(06)+004(06)

М.О. ЖУКОВА, А.О. НАБИЛКОВА, М.В. МЕЛЬНИК,
А.О. ИСМАГИЛОВ, М.С. ГУСЕЛЬНИКОВ,
С.А. КОЗЛОВ, А.Н. ЦЫПКИН
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ НЕЛИНЕЙНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

Приведён обзор существующих экспериментальных методов оценки нелинейных характеристик материалов в терагерцовом (ТГц) диапазоне частот (0,1 - 3 ТГц). Оттенены особенности возникающих нелинейностей как в жидких, так и в твёрдых средах под действием импульсного ТГц-излучения. Представлены способы оптимизации и увеличения чувствительности метода z-сканирования для измерения коэффициента нелинейного показателя преломления.

M.O. ZHUKOVA, A.O. NABILKOVA, M.V. MELNIK,
A.O. ISMAGILOV, M.S. GUSELNIKOV,
S.A. KOZLOV, A.N. TCYPKIN
ITMO University, Saint-Petersburg

EXPERIMENTAL TECHNIQUES FOR MATERIAL NONLINEARITY ESTIMATIONS IN THE TERAHERTZ FREQUENCY RANGE

A review of existing experimental methods for evaluating nonlinear characteristics of materials in the terahertz (THz) frequency range (0.1 - 3 THz) is given. The features of arising nonlinearities in both liquid and solid media under the action of pulsed THz radiation are emphasized. Methods of optimization and increasing the sensitivity of the z-scan method for measuring the nonlinear refractive index coefficient are presented.

Основным трендом развития фотоники на сегодняшний день называют расширение охвата как по областям применения существующих технологий, так и по возможности адаптации существующих техник и материалов в не исследуемых ранее диапазонах частот. Развитие физики и техники терагерцового (ТГц) диапазона частот востребована для систем интроскопии, коммуникаций и многих фундаментальных исследований. компонентной базы систем управления света-светом, например явление оптической бистабильности для сверхбыстрых переключателей [1 - 3].

Существует ряд методик, позволяющих прямым или косвенным путем измерять нелинейные характеристики сред в ТГц-диапазоне частот [4]: спектроскопия накачка-зондирование, спектроскопия с разрешением во времени, метод z-сканирования и другие.

В данной работе рассмотрены особенности экспериментального обнаружения гигантской малоинерционной нелинейности показателя преломления колебательной природы в кристаллах и жидкостях классическим методом z-сканирования с использованием импульсного ТГц-излучения.

Также приведены результаты последних работ [5] по оптимизации z-скан метода с введением диска для перекрытия центральной области пучка, ранее применимого лишь в оптическом диапазоне [6]. Схема такой установки приведена на рис. 1.

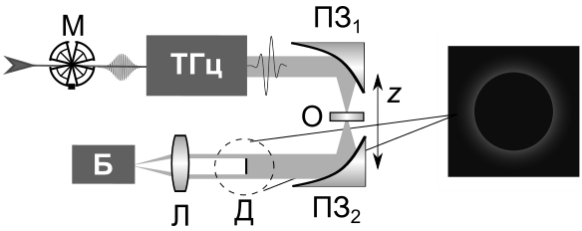


Рис. 1. Схема экспериментальной установки модифицированного метода z-сканирования: М – модулятор, ТГц – генератор интенсивного ТГц-излучения TERA-AX, ПЗ – параболические зеркала, О – образец, перемещения образца, Д – дисковая апертура, Л – линза, Б – болометр, на вставке – ПЗС-изображение ТГц-пучка после прохождения им дисковой апертуры

Использование данного метода и учёт особенностей ТГц импульсного излучения позволили измерить коэффициент нелинейного показателя преломления порядка 10^{-11} см^2/Вт (кристалл ниобата лития) на установке, где ранее чувствительность позволяла измерить значения на два порядка выше.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ в рамках гранта № 24-22-00084,

Список литературы

1. Tcypkin A., Melnik M., et al. // Terahertz Liquid Photonics. 2023. P. 76-114.
2. Novelli F. // Optics Express. 2024. V. 32. P. 11041-11056.
3. Wen C., Wei L., et. al. // Applied Physics A. 2020. V. 126. P. 1-8.
4. Garriga F., Kareem J., et al. // Optics Letters. 2020. V. 45. P. 5628-5631.
5. Nabilkova A., Ismagilov A., et. al. // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2024. V. 14. P. 718.
6. Xia T., Hagan D.J., et al. // Optics letters. 1994. V. 19. P. 317-319.

УДК 535(06)+004(06)

В.К. УРЮПИНА[1,2], Н.Н. ЛОСЕВСКИЙ[2], А.М. МАЙОРОВА[2]
[1]*Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева*
[2]*Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН*

ВОЗМОЖНОСТИ ОПТОТЕРМИЧЕСКИХ ЛОВУШЕК ДЛЯ РАВНОМЕРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРООБЪЕКТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ

Работа направлена на равномерное позиционирование микрочастиц (полимерных и биологического типа) на поверхности кюветы с образцами с использованием оптотермических и оптических ловушек. Массивы точечных ловушек формируются за счёт использования фазовых масок различных типов, реализованных с помощью ЖК ПМС. Исследованы возможности точного позиционирования микрообъектов в ловушках в зависимости от размера точечных пятен и расстояния между ними, концентрации частиц в образце, свойств раствора, а также типа используемой ловушки. Демонстрируются возможности фиксации микрообъектов в заданных конфигурациях.

V.K. URYUPINA[1,2], N.N. LOSEVSKY[2], A.M. MAYOROVA[2]
[1]*Samara National Research University*
[2]*Samara branch of the Lebedev Physical Institute*

THE POSSIBILITIES OF OPTOTHERMAL TRAPS FOR THE UNIFORM DISTRIBUTION OF MICRO-OBJECTS ON THE SURFACE

The work is aimed at uniform positioning of microparticles (polymer and biological types) on the surface of the sample cuvette using optothermal and optical traps. Arrays of point traps are formed through the use of phase masks of various types, implemented using LCD PMS. The possibilities of precise positioning of micro-objects in traps are investigated depending on the size of the point spots and the distance between them, the concentration of particles in the sample, the properties of the solution, as well as the type of trap used. The possibilities of fixing micro-objects in specified configurations are demonstrated.

Бесконтактные техники транспортировки микронных и субмикронных объектов, включая отдельные клетки и микроорганизмы, их позиционирование, выстраивание в различные конфигурации и фиксация, актуальны для задач биотехнологий и активно развиваются последние десятилетия. Например, поиск новых способов выделения и культивирования микроорганизмов является важным направлением

современной микробиологии, задача формирования различных конфигураций клеток актуальна для тканевой инженерии [1].

Оптические и оптотермические ловушки – универсальные неинвазивные инструменты для захвата и перемещения микрообъектов [1 - 3]. В [3] задачу равномерного позиционирования микрообъектов с помощью оптотермической ловушки предложено решить за счёт формирования массива точечных ловушек. В работе предложено использовать мозаичные дифракционные оптические элементы с субэлементами в форме квадрата и шестиугольника в схеме оптотермической ловушки для формирования равномерного массива точечных пятен. Проведены предварительные эксперименты по захвату латексных микрочастиц (рис. 1), однако эффективной реализации равномерного распределения микрочастиц с использованием предлагаемых ДОЭ и оптотермической ловушки достичь не удалось.



Рис. 1. Попытка равномерного оптотермического захвата и фиксации клеток латексных микросфер размером 2 мм в сложной конфигурации

В настоящей работе эксперименты продолжены в различных схемах ловушек, была исследована возможность равномерного распределения микрообъектов в ловушках различных форм в зависимости от природы частиц, их концентрации, соотношения расстояний между точками в массивах ловушек, концентрации раствора альбумина.

Авторы выражают благодарность за предоставленные фазовые распределения сотрудникам СФ ФИАН Прокоповой Д.В. и Самагину С.А.

Список литературы

1. Kumar Ph. T., Decrop D., et. al. // Micromachines. 2020. V 11 (3), P. 308.

2. Котова С.П., Лосевский Н.Н. и др. // Известия РАН. Серия физическая. 2022. Т. 86 (12). С. 1685-1689.

3. Майорова А.М., Котова С.П., и др. // Известия РАН. Серия физическая. 2024. Т. 88 (12).

УДК 535(06)+004(06)

А.А. КРИВЕЦКАЯ[1,2], Д.М. КУСТОВ[1], В.В. ЛЕВКИН[3],
С.С. ХАРНАС[3], Т.А. САВЕЛЬЕВА[1,2]
[1]*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*
[2]*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*
[3]*Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова*

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТРАОПЕРАЦИОННОЙ ДИНАМИКИ УРОВНЯ КРОВОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛУДКА МЕТОДОМ СПЕКТРОСКОПИИ ДИФФУЗНОГО РАССЕЯНИЯ

Приведены результаты исследования кровоснабжения тканей желудка по уровню их насыщения (сатурации) кислородом, определённого методом спектроскопии диффузного рассеяния. Измерения проводились на нескольких этапах во время операции. Проведён анализ зависимости степени сатурации от времени после пересечения сосудов. Оценена чувствительность представляемой методики и возможность её применения в клинической практике.

A.A. KRIVETSKAYA[1,2], D.M. KUSTOV[1], V.V. LEVKIN[3],
S.S. KHARNAS[3], T.A. SAVELIEVA[1,2]
[1]*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*
[2]*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*
[3]*Sechenov First Moscow State Medical University*

INVESTIGATION OF INTRAOPERATIVE DYNAMICS OF THE GASTRIC BLOOD SUPPLY LEVEL BY DIFFUSE SCATTERING SPECTROSCOPY

The results of the study of the blood supply to gastric tissues by the level of their oxygen saturation, determined by the method of diffuse scattering spectroscopy, are presented. Measurements were carried out at several stages during the surgery. The analysis of the dependence of the saturation degree on the time after crossing the vessels was carried out. The sensitivity of the presented technique and the possibility of its application in clinical practice are evaluated.

Применение методики, позволяющей проводить интраоперационную оценку уровня кровоснабжения тканей желудочно-кишечного тракта путём получения количественных данных, позволяет, имея объективную информацию о состоянии биологических тканей, повысить долю

успешных исходов хирургических процедур за счёт снижения частоты возникновения послеоперационных осложнений [1].

Целью данной работы является проведение интраоперационной апробации метода спектроскопии диффузного рассеяния для оценки уровня кровоснабжения тканей желудочно-кишечного тракта по измеренным значениям их сатурации кислородом во время хирургических операций по резекции желудка. Оборудование, используемое для оценки состояния биологических тканей, включает спектрометр «ЛЭСА-01-БИОСПЕК», диодный широкополосный источник излучения в видимом диапазоне длин волн, оптическое волокно, а также программное обеспечение для регистрации спектров и обработки полученных данных.

Принцип оценки уровня сатурации биологических тканей кислородом основан на исследовании взаимодействии излучения с тканями. Основным поглотителем исследуемых биологических объектов в видимом спектральном диапазоне является гемоглобин. Алгоритм, описывающий процесс извлечения количественных данных из регистрируемых спектров, представлен в работах [2, 3]. Также были опубликованы результаты применения данного метода на тканях толстой кишки [3] и пищевода [4].

По результатам измерений во время резекции желудка можно сделать вывод, что представляемая методика является чувствительной к интраоперационным изменениям уровня кровоснабжения тканей желудочно-кишечного тракта. Исследование зависимости степени сатурации тканей желудка кислородом от времени после пересечения сосудов, питающих данный орган, показало, что в течение пятнадцати минут после мобилизации ткани остаются жизнеспособными.

Таким образом, метод спектроскопии диффузного рассеяния может применяться для объективной интраоперационной оценки состояния тканей во время резекции желудка.

Работа выполнена в рамках государственного задания НИЯУ МИФИ (FSWU-2023-0070).

Список литературы

1. Clancy N., Arya S., et al. // Biomedical optics express. 2015. V. 6 (10). P. 4179-4190.
2. Stratonnikov A.A., Loschenov V.B. // J. Biomed. Opt. 2001. V. 6 (4).
3. Kustov D.M., Savelieva T.A., et al. // Photonics. 2021. V. 8. P. 427.
4. Krivetskaya A.A., Kustov D.M., et al. // Photodiagnosis Photodyn. Ther. 2024. V. 45. P. 103937.

УДК 535(06)+004(06)

И.Н. САРАЕВА, Э.Р. ТОЛОРДАВА, Р.А. ХМЕЛЬНИЦКИЙ, С.Н. ШЕЛЫГИНА, Д.С. ПОЗДНЯКОВА[1], А.Н. НАСТУЛЯВИЧУС, С.И. КУДРЯШОВ

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва
[1]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ЛАЗЕРНО-АБЛЯЦИОННАЯ ГЕНЕРАЦИЯ АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫХ ГЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ НАНОЧАСТИЦ: ИССЛЕДОВАНИЯ IN VITRO

В работе представлен мультипараметрический анализ эффекта антибактериальных наногелей на основе наночастиц серебра, меди и селена на примере одно- и многокомпонентных биоплёнок грамположительных (S. Aureus (SA), S. epidermis (SE)) и грамотрицательных бактерий (E. Coli (EC), K. Pneumoniae (KP), P. Aeruginosa (PA)). Наногели получены методом одностадийной наносекундной лазерной абляции в средах глицерина, силиконового масла и вазелина, которые являются биосовместимыми материалами с низкой себестоимостью, подходящими для использования в раневых повязках.

I.N. SARAEVA, E.R. TOLORDAVA, R.A. KHMELNITSKY, S.N. SHELYGINA, D.S. POZDNYAKOVA[1], A.N. NASTULYAVICHUS, S.I. KUDRYASHOV

Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow
[1]National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

LASER ABLATIVE FABRICATION OF ANTIBACTERIAL NANOPARTILCE-BASED GELS: IN VITRO STUDIES

The paper presents a multiparametric analysis of the effect of antibacterial nanogels based on silver, copper and selenium nanopartilces using on single- and multicomponent biofilms of gram-positive (S. aureus (SA), S. epidermis (SE)) and gram-negative bacteria (E. coli (EC), K. pneumoniae (KP), P. aeruginosa (PA)). Nanogels were obtained by single-stage nanosecond laser ablation in glycerol, silicone oil, petroleum jelly, which are biocompatible, low-cost materials suitable for use in wound dressings.

Биоплёнки представляют собой бактериальные сообщества, находящиеся в экзополимерной матрице (рис. 1), которая обеспечивает оптимальные условия существования и дополнительную защиту от используемых антибиотиков. Биоплёнки могут привести к снижению или полному нивелированию лечения, а также к появлению незаживающих

ран. В настоящее время бактерии приобретают резистентность к ряду антибиотиков, в связи с чем актуальным становится поиск бактерицидных агентов, к которым сложнее приобрести резистентность. Наночастицы являются хорошей альтернативой, и обладают доказанной эффективностью в борьбе с биоплёнками [1, 2].

Выбранные основы для наногелей включали в себя глицерин, вазелин, силиконовое масло. Массивные мишени Ag, Cu или Se располагались в стеклянной кювете под двухмиллиметровым слоем деионизированной воды, IPA, глицерина, силиконового масла или расплавленного вазелина, после чего лазерная система HTF MARK (ОКБ Булат, Москва, Россия) с длиной волны 1064 нм и длительностью импульса 120 нс использовалась для генерации наночастиц со скоростью перемещения луча 500 мм/с, частотой повторения импульсов 20 кГц, энергией в импульсе 0.9 мДж. Антибактериальные свойства наногелей предварительно исследовались на примере планктонных культур SA, PA, EC, SE, KP и KP+SE. Анализ эффективности осуществлялся с использованием штаммов SA, PA, EC, SE, KP и их комбинаций SA+SE+PA (SPA), SE+EC (SEC) и EC+KP (ECK). Фурье-ИК-спектры биоплёнок регистрировались при помощи инфракрасного спектрофотометра V-70 (Brucker, Германия), после чего производился PCA-анализ спектров (рис. 2). Использование наногелей привело к снижению популяции бактерий на несколько порядков.

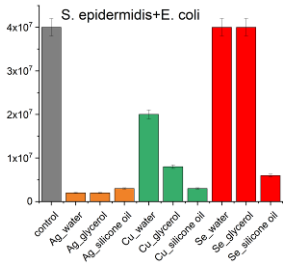


Рис. 1. Жизнеспособность комбинированной биоплёнки S. epidermidis+E. coli (КОЕ/мл)

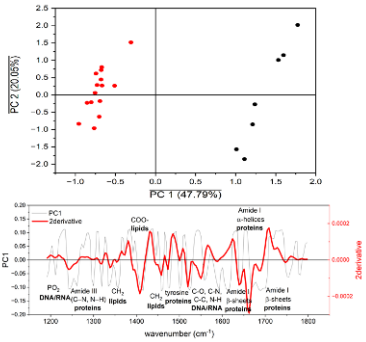


Рис. 2. Результаты PCA-анализа бактериальных биоплёнок до и после обработки антибактериальными гелями

Список литературы

1. Dakal T.C., Kumar A., et al. // Microbiology. 2016. V. 7. P. 1831.
2. Moradi F., Ghaedi A., et al. // Heliyon. 2023. V. 9. P. e22105.

УДК 535(06)+004(06)

В.А. МАСЛОВА[1], Г.А. ЕРМОЛАЕВ[2], Е.С. АНДРИАНОВ[1,3], Д.Г. БАРАНОВ[1]

[1]Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный
[2]Исследовательский центр новых технологий, XPANCEO, Дубай, ОАЭ
[3]Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Москва

ВЛИЯНИЕ ШУМОВ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ БИОСЕНСОРА НА ОСНОВЕ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ФАЗОВОЙ СИНГУЛЯРНОСТИ

Теоретически исследовано влияние дробового шума на работу сенсора на основе фазовой сингулярности в простейшей эллипсометрической схеме. Продемонстрировано, что угол падения служит эффективным параметром управления чувствительностью и разрешением такого сенсора.

V.A. MASLOVA[1], G.A. ERMOLAEV[2], E.S. ANDRIANOV[1,3], D.G. BARANOV[1]

[1]Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny
[2]Emerging Technologies Research Center XPANCEO, Dubai, United Arab Emirates
[3]N.L. Dukhov All-Russian Scientific Research Institute of Automatics, Moscow

NOISES IMPACT ON THE SENSITIVITY OF TOPOLOGICAL PHASE SINGULARITY-BASED BIOSENSOR

The effect of shot noise on the operation of a phase singularity-based sensor in a simple ellipsometric scheme is theoretically investigated. It is demonstrated that the incidence angle serves as an effective parameter for controlling the sensitivity and resolution of such a sensor.

Топологические сингулярности в оптических функциях отклика, таких как амплитуды отражения, предлагают ряд практических приложений, от аналоговой обработки сигналов до инновационных методов молекулярного зондирования [1 - 3]. Рефрактометрический сенсор, основанный на фазовых сингулярностях, регистрирует динамические изменения в оптическом поле вблизи точки сингулярности, возникающей в нуле функции отклика. Это приводит к важному вопросу: как ведут себя чувствительность и разрешение таких сенсоров при работе вблизи нуля функции отклика, где различные источники шума могут существенно влиять на обнаруженный сигнал.

В данной работе мы систематически исследуем влияние дробового шума на производительность рефрактометрического сенсора на основе фазовой сингулярности. Мы разрабатываем теоретическую модель для системы спектроскопической эллипсометрии, функционирующей вблизи фазовой сингулярности, интегрируя в стандартную экспериментальную схему модель дробового шума [4]. Простейшая схема эллипсометрического эксперимента изображена на рис. 1. Наши результаты иллюстрируют роль дробового шума в детекторе и его влияние на чувствительность и разрешение сенсора (рис. 2). В частности, наши результаты показывают, что сенсор на основе фазовой сингулярности в эллипсометрической схеме остается стабильным даже при наличии дробового шума вблизи нулевой точки отражения.

Результаты моделирования эллипсометрического эксперимента демонстрируют, что угол падения служит эффективным параметром управления для регулировки точности и надежности измерения изменений показателя преломления аналита. Эта возможность позволяет топологическим сенсорам темноты эффективно функционировать даже при низкой мощности источника света, повышая их устойчивость к шуму и делая возможным их использование в компактных носимых устройствах, таких как интеллектуальные контактные линзы. Однако важно отметить, что отдаление от топологической точки снижает чувствительность сенсора, что впоследствии уменьшает минимально измеряемое изменение фазы. Этот сценарий создает сложное взаимодействие между чувствительностью и разрешением, что представляет собой значительную проблему в этой области.

Работа выполнена при поддержке Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС», грант № 24-1-5-136-1, и Российского научного фонда, проект № 23-72-10005

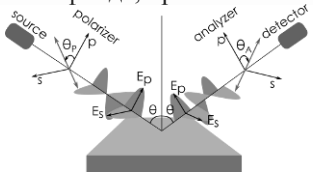


Рис. 1. Схема эллипсометрического эксперимента

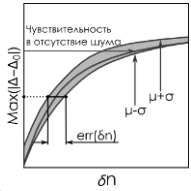


Рис. 2. Влияние шума на результат измерений

Список литературы

1. Kravets V.G., et al. // Nature Materials. 2013. V. 12. P. 304.
2. Ermolaev G., et al. // Nat. Commun. 2022. V. 13. P. 2049.
3. Tselikov G.I., et al. // ACS nano. 2023. V. 17. P. 19338.
4. Carmichael H., et al. // Springer Science & Business Media, 2009. V. 18.

УДК 535(06)+004(06)

К.А. ЦЕЛОГОРОДЦЕВ[1,2], С.П. КОТОВА[1,2], Н.Н. ЛОСЕВСКИЙ[2], В.К. УРЮПИНА[1,2]
[1]*Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева*
[2]*Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН*

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ МАНИПУЛЯЦИИ МИКРООБЪЕКТАМИ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

В работе представлен результат разработки нового метода автоматического формирования световых полей необходимой формы на основе линейной комбинации гауссовых пучков. Метод предлагается использовать для задач оптической манипуляциями микрообъектами сложных форм или группами одиночных клеток. Аппаратно-программный комплекс опробован в схеме оптического пинцета для пространственной манипуляции различными микрообъектами.

K.A. TSELOGORODTSEV[1,2], S.P. KOTOVA[1,2], N.N. LOSEVSKY[2], V.K. URYUPINA[1,2]
[1]*Samara National Research University*
[2]*Samara branch of the Lebedev Physical Institute*

HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX FOR OPTICAL MANIPULATION OF MICRO-OBJECTS OF COMPLEX SHAPE

The paper presents the result of the development of a new method for the automatic formation of light fields of the required shape based on a linear combination of Gaussian beams. The method is proposed to be used for optical manipulation of micro-objects of complex shapes or groups of single cells. The hardware and software complex has been tested in the scheme of optical tweezers for spatial manipulation of various micro-objects.

Пространственная структура светового поля является важным аспектом в задачах оптических и лазерных технологий. Создание световых полей с заданным распределением интенсивности и фазы на сегодняшний день представляют особый интерес для различных научных сфер [1]. Для оптической манипуляции микрочастицами сложной формы или группой одиночных микрообъектов, возможно использовать световые поля, состоящие из линейной композиции смещённых гауссовых пучков [2].

Разработанный аппаратно-программный комплекс позволяет формировать уникальные для конкретной задачи световые поля. Программа включает в себя: обработку фотографии выбранного объекта манипулирования и определение его контура; подбор расположения набора точек таким образом, чтобы они были на равном расстоянии друг от друга; создание спирального пучка в виде суперпозиции смешенных гауссовых пучков; расчёт фурье-образа для проверки, что пучок получился спиральным; расчёт и сохранение фазового распределения полученного спирального пучка в полярных координатах. Отметим, что созданные таким образом световые поля обладают свойством вращения в области фокусировки.

В физическом эксперименте световые поля формировались при помощи ЖК ПМС PLUTO-2-NIR-011 в схеме оптической ловушки [2]. В рабочей зоне оптического пинцета получаем набор точечных ловушек, распределённый вдоль контура выбранного объекта и удерживающий его. В таком случае становится возможным осуществлять оптическое перемещение или поворот исследуемого объекта. На рис. 1 представлен пример формирования светового поля в виде шести гауссовых пучков для захвата и удержания прозрачного объекта неправильной формы.

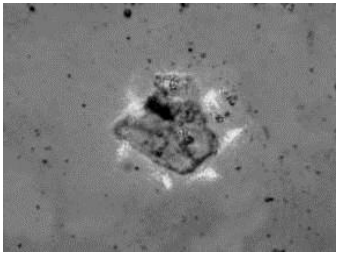


Рис. 1. Захват и удержание световым полем в виде шести гауссовых точечных пучков одиночного объекта неправильной формы

Таким образом, разработанный аппаратно-программный комплекс успешно применён для захвата, удержания и поворота микроскопического объекта неправильной формы.

Список литературы

1. Zhu L., Tai Y., Li H., Hu H., Li Xi., Cai Ya., Shen Yi. // Photonics Research. 2023. V. 11 (9). P. 1524-1534.

2. Uryupina V.K., Tselogorodtsev K.A., Losevsky N.N., Razueva, E.V. // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2024. V. 51 (7). P. 250-255.

УДК 535(06)+004(06)

Д.А. ФОФАНОВ
ООО «АРЛИ спецтехника», Москва

О НЕОБХОДИМОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСА ТЕХНОЛОГИЙ РАДИОФОТОНИКИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ БОРЬБЫ: ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ, ПЕРСПЕКТИВЫ И НЕОБХОДИМЫЕ ПЕРВООЧЕРЕДНЫЕ ШАГИ

С точки зрения частной компании, специализирующейся на средствах радиоэлектронной борьбы тактического звена, приведён пример и показан путь практического внедрения технологий радиофотоники для создания передовых образцов специальной техники для специальных подразделений и служб в интересах Российской Федерации и дружественных государств. Определены потребности в отечественной компонентной базе и требуемые характеристики. Дана субъективная оценка современного состояния радиофотоники в Российской Федерации. Сформулированы запросы на создание радиофотонных компонентов с конкретными характеристиками, подкрепленные коммерческим интересом. С точки зрения компании – потребителя радиофотонных компонентов, которая одной из первых в Российской Федерации вложила собственные средства в данное направление, дана субъективная оценка необходимых первоочередных шагов.

D.A. FOFANOV
Scientific and Research Company «ARLI Spetstechnika», Moscow

SPECIAL NEEDS IN RADIO PHOTONIC TECHNOLOGIES FOR MODERN ELECTRONIC WARFARE SYSTEMS: CURRENT STATUS, PROSPECTS AND NECESSARY PRIORITY STEPS

An example is given and a path for the practical implementation of microwave photonics technologies to create advanced models of special equipment for special units and services in the interests of the Russian Federation and friendly states is shown from the point of view of a private company specializing in tactical electronic warfare systems. The needs required characteristics for a national component base have been determined. A current progress subjective assessment in the field of microwave photonics in Russian Federation is given. Requests for creation microwave photonic components with specific characteristics, supported by commercial interest, have been formulated. Being a company – consumer of microwave photonic components, one of the first in Russian Federation to invest its own funds in this area, a subjective assessment of the necessary priority steps is given from that point of view.

Компания «АРЛИ спецтехника» в инициативном порядке развивает уже несколько лет проекты в области радиоэлектронной борьбы тактического звена с применением технологий радиофотоники, имея как большой опыт, так и твёрдое намерение и дальше двигаться в выбранном направлении. На примере проекта по созданию формирователя ответных ретрансляционных помех для защиты особо охраняемых лиц и объектов показаны подходы к практическому применению технологий радиофотоники с точки зрения частного производителя радиоэлектронного оборудования, который, по имеющейся у автора информации, первым в Российской Федерации инвестировал собственные средства в исследования и разработки в области радиофотоники, а также получил ряд патентов на изобретения [1, 2].

Компания «АРЛИ спецтехника» уже на протяжении более чем 30 лет успешно удовлетворяет платежеспособный спрос со стороны клиентов в сфере тактической радиоэлектронной борьбы. В эту область входят блокираторы радиоуправляемых взрывных устройств, комплексы борьбы с беспилотными летательными аппаратами, блокираторы приёмников аппаратуры потребителей глобальных навигационных спутниковых систем, ну и некоторые другие, так называемые «специальные», комплексы. С самых общих позиций задача разрабатываемой аппаратуры сводится к снижению отношения сигнал/шум, или, что в общем тоже самое, к повышению вероятности ошибок в приёмнике командной радиолинии, функционирующей на заранее неизвестной частоте. Для решения данной задачи мы создаем аппаратуру, функционирующую в диапазоне от 20 до 6000 МГц, с интегральной излучаемой мощностью от 50 до 500 Ватт. При этом, уже на протяжении как минимум 10 - 12 лет, мы наблюдаем тенденцию, во-первых, к расширению частотного диапазона, в которых работают эти командные радиолинии, а во-вторых, к существенному снижению себестоимости аппаратуры данных радиолиний. Сначала это было видно по радиоуправляемым взрывным устройствам, ну а теперь и по беспилотным летательным аппаратам. Частотный диапазон всё время расширяется, и распределять мощность тонким слоем по всему частотному диапазону это тупиковый путь. Для повышения эффективности использования имеющегося у аппаратуры запаса мощности, потребовалось менять подходы к формированию помех.

Перейдя сначала к реактивному формированию помех, по сути, сочетающему в себе радиоэлектронную разведку с радиоэлектронным подавлением в автоматическом режиме, в том числе фурье-анализ

принятого сигнала, определение частот, где спектр превышает пороговый уровень, и формирование на этих частотах помехи с заранее определёнными характеристиками (например, из библиотеки, из базы данных), далее мы перешли к подклассу данного типа помех, к ретрансляционным помехам, использующим структуру и спектр самого командного радиосигнала для формирования помехи на его основе и к необходимости задействовать технологии радиофотоники.

За счёт небольшого компромисса, а именно, путём отказа от максимальной гибкости в выборе параметров ответного помехового сигнала, можно обеспечить решение задачи радиофотонным способом, по сути являющимся аналоговым, а не цифровым [3, 4]. В данном применении раскрываются и задействуются такие преимущества радиофотоники как широкополосность трактов передачи и обработки, стойкость к электромагнитному излучению, в первую очередь к своему же собственному излучению, а также малогабаритность волоконно-оптического световода как среды задержки радиосигнала. Самые общие схемы работы изделия, которые возможно опубликовать, показаны на рис 1 и 2.

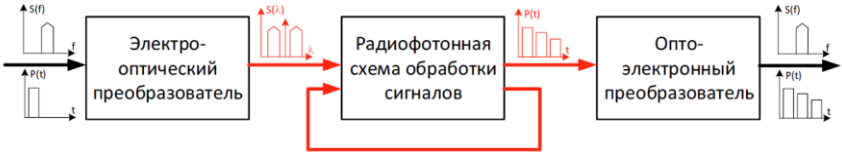


Рис. 1. Обобщённая схема работы формирователя
ответных ретрансляционных помех

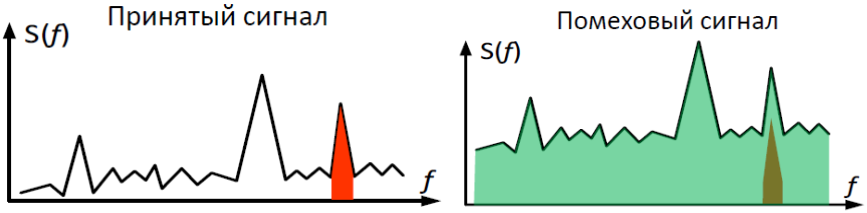


Рис. 2. Схематическое изображение сигналов на входе и выходе формирователя

Необходимо отметить, что описанное изделие создано с применением зарубежной компонентной базы, причём в единичном образце. Масштабирование производства невозможно без должной поддержки со

стороны федеральных органов исполнительной власти, а также без появления в Российской Федерации достаточной номенклатуры оптоэлектронной компонентной базы с должными характеристиками, в том числе: полупроводниковых лазерных модулей, электрооптических модуляторов интенсивности, полупроводниковых оптических усилителей, матричных оптических переключателей, управляемых оптических аттенюаторов и фотодетекторных модулей.

С точки зрения компании «АРЛИ спецтехника» наиболее острыми проблемами, препятствующими появлению в серийном количестве устройств, подобных описанному, являются: нехватка специалистов системотехнического и схемотехнического звена; недостаточность номенклатуры отечественной компонентной базы при невозможности закрыть все потребности импортом из дружественных стран; высокая стоимость компонентов, приводящая к неконкурентоспособности радиофотонных решений по цене для потребителя в сравнении с сугубо радиоэлектронными; отсутствие исчерпывающей информации по показателям надежности и стойкости к внешним воздействующим факторам для многих радиофотонных компонентов; принципиальная невозможность масштабирования некоторых технических решений до появления качественной интегральной радиофотонной компонентной базы.

Компания «АРЛИ спецтехника» выражает надежду на то, что, благодаря недавним кадровым решениям, принятым на высшем уровне, исследования и работы в области радиофотоники в Российской Федерации продолжат своё целенаправленное и непрерывное прогрессивное движение, с четкими, взаимоувязанными между собой целями и задачами.

Список литературы

1. Лившиц А.Г. Устройство для защиты от радиоуправляемых взрывных устройств. Патент RU2746212C1.Приоритет 07.08.2020.

2. Лившиц А.Г, Фофанов Д.А. Устройство формирования ответных помех радиолокационным станциям. Патент RU2771356C1. Приоритет 16.07.2021.

3. Belkin M.E., Fofanov D., Livshits A. Photonics concept to design responsive radiocommunication jammer of radio-controlled improvised explosive devices // Proc. International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE). Istanbul, Turkey, 2020. P. 1-5.

4. Belkin M.E., Fofanov D., Alyoshin A. Optoelectronic-processor-based responsive jamming: a new design trend to prevent remote terroristic attacks using radio-communication channel // Proc. Fourth World Conference on Smart Trends in Systems, Security and Sustainability (WorldS4., London, UK, 2020. P. 335-340.

УДК 535(06)+004(06)

М.В. ПАРФЕНОВ, А.В. ВАРЛАМОВ, И.В. ИЛЬИЧЕВ,
А.А. УСИКОВА, А.В. ТРОНЕВ, П.М. АГРУЗОВ, А.В. ШАМРАЙ
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

ТОНКОПЛЁНОЧНЫЙ НИОБАТ ЛИТИЯ ОТКРЫВАЕТ НОВЫЕ ГОРИЗОНТЫ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЙ МОДУЛЯЦИИ И ТЕРАГЕРЦОВОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ФОТОНИКИ

Ниобат лития, благодаря уникальным свойствам и хорошо отработанной технологии формирования оптических волноводов, предлагает широкие возможности по созданию интегрально-оптических устройств для управления оптическим излучением, причём физические механизмы управления обеспечивают рекордные скорости управления. Дан обзор современного состояния и достигнутого значительного прогресса в области сверхвысокочастотной интегральной фотоники на основе ниобата лития, связанного с использованием гибридных подложек тонкоплёночного ниобата лития на изоляторе. Обсуждаются и сопоставляются с мировым уровнем результаты, полученные в ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Дается анализ перспектив развития и существующие вызовы.

M.V. PARFENOV, A.V. VARLAMOV, I.V. ILYICHEV,
A.A. USIKOVA, A.V. TRONEV, P.M. AGRUZOV, A.V. SHAMRAY
Ioffe Institute, Saint-Petersburg

THIN-FILM LITHIUM NIOBATE OPENS NEW HORIZONS OF ULTRA-WIDEBAND MODULATION AND TERAHERTZ INTEGRATED PHOTONICS

Due to its unique properties and well-developed technology for the fabrication of optical waveguides, lithium niobate offers wide possibilities for the development of integrated optical devices for the light control, and the physical control mechanisms provide record control speeds. Overview of the current state and significant progress achieved in the field of ultra-high-frequency integrated photonics based on lithium niobate, associated with the use of hybrid substrates of thin-film lithium niobate on an insulator is given. Obtained at the Ioffe Institute results are discussed and compared with the world level. An analysis of development prospects and existing challenges is given.

Электрооптические модуляторы являются ключевым элементом [1] многих оптико-информационных систем. Они переносят широкополосные электрические сигналы на оптическую несущую и лежат в основе оптической связи, обработки микроволновых сигналов, волоконно-оптических датчиков и квантовых технологий. Тонкоплёночный ниобат

лития (ТПНЛ) рассматривается как перспективная материальная платформа для управляемой интегральной фотоники следующего поколения [2]. ТПНЛ унаследовал почти все материальные преимущества от хорошо зарекомендовавших себя интегрально-оптических модуляторов на объёмных кристаллических подложках ниобата лития и усиливает их за счёт меньших габаритов, повышения плотности интеграции, более широкой полосы электрооптической модуляции и низкого управляющего напряжения (энергопотребления). С момента появления коммерчески доступных пластин ТПНЛ [3], всего несколько лет назад, характеристики ТПНЛ модуляторов уже превосходят лучшие образцы на основе других материальных платформ, фосфид индия и кремний на изоляторе. В обзоре обсуждаются принципы построения ТФЛН модуляторов, позволившие продемонстрировать современные достижения данной материальной платформы. Рассматривается несколько подходов, их преимущества и проблемы. Представлены оригинальные результаты ФТИ им. А.Ф. Иоффе в области ТПЛН модуляторов (рис. 1) [4, 5], проведено их сравнение с мировым уровнем по эффективности модуляции и достижимой полосы частот (рис. 2). Мы также намечаем пути, совершенствования технологии и конструкции модуляторов на основе ТПЛН, и даем перспективу того, какого уровня технических характеристик, по нашему мнению, можно достичь в будущем. Также рассматриваем новые возможности фотонных интегральных схем для передовых применений, таких как квантовые информационные системы и системы на основе терагерцового излучения.

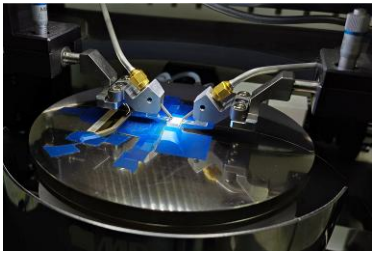


Рис. 1. Фазовый ТПЛН модулятор, изготовленный в ФТИ им. А.Ф. Иоффе

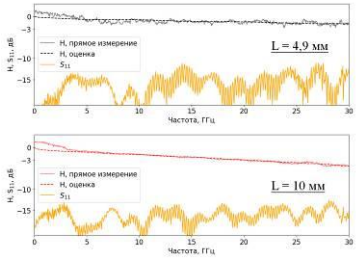


Рис. 2. Полоса частот ТПЛН-модулятора, изготовленного в ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Список литературы

1. Zhang M., et al. // Optica. 2021. V. 8. No. 5. P. 652-667.
2. Chen G., et al. // Adv. Photonics Res. 2023. V. 4. P, 2300229.
3. https://m.ru.nanoln.com/.
4. Parfenov M.V., et al. // Nanomaterials. 2023. V. 13. P. 2755.
5. Parfenov M.V., et al. // International Conference Laser Optics. Saint-Petersburg, 2024. P. 173.

УДК 535(06)+004(06)

Р.С. ПОНОМАРЕВ, А.С. ПАНЬКОВ, Л.О. ЖУКОВ
Пермский государственный национальный исследовательский университет

СБОРКА ФОТОННЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ: ПОЧЕМУ ТАК ТРУДНО СДЕЛАТЬ ТО, ЧТО ВЫГЛЯДИТ ТАК ПРОСТО

В работе обсуждаются вопросы сборки фотонных интегральных схем (ФИС), в частности ввода и вывода излучения в чипы фотонных интегральных схем в вертикальной и горизонтальной геометрии. Особое внимание уделяется источникам погрешностей при юстировке оптической системы и методам их минимизации. Приведены оценки влияния различных факторов на уровень оптических потерь, возникающих при сборке фотонной интегральной схемы.

R.S. PONOMAREV, A.S. PANKOV, L.O. ZHUKOV
Perm State National Research University

PHOTONIC INTEGRATED CHIP ASSEMBLING: WHY IS IT SO HARD TO DO WHAT LOOKS SO EASY

The paper discusses the assembly of photonic integrated circuits (PICs), in particular the input and output of light into photonic integrated circuit chips in vertical and horizontal geometry. Particular attention is paid to the sources of errors when adjusting the optical system and methods for minimizing them. Estimates of the influence of various factors on the level of optical losses arising during the assembly of a photonic integrated circuit are given.

Фотонные интегральные схемы (ФИС) являются основой современного высокоскоростного интернета, обеспечивая работу систем спектрального уплотнения сигнала и высокочастотную модуляцию [1]. Кроме того, ФИС используются в системах обработки сигналов волоконно-оптических датчиков [2], в системах инерциальной навигации [3], в лазерах и системах квантовой связи [4], в системах типа lab-on-chip [5]. Несмотря на высокую востребованность во множестве отраслей науки и техники, ФИС остаются нишевым продуктом в основном из-за своей высокой стоимости. Стоимость ФИС в сборке определяется не столько стоимостью исходного кристалла, сколько процессами сборки и тестирования ФИС, вклад которых нередко достигает 80 % от стоимости конечного устройства. Это объясняется тем, что ввод и вывод излучения в ФИС требуется проводить с субмикронной или нанометровой точностью,

при этом процесс является многоступенчатым, плохо автоматизируется и требует высокой квалификации оператора.

Целью данной работы является демонстрация подходов к стыковке ФИС в ручном или полуавтоматическом режиме, что в данный момент, когда отрасль ещё не достигла зрелости, является наиболее востребованным направлением. В работе показано, как влияют на оптические потери погрешности в расположении оптических волокон относительно дифракционных решёток (рис. 1), несоответствие модовых полей применяемых линзованных оптических волокон и элементов ввода, расположенных на чипе и другие широко распространённые источники погрешности.



Рис. 1. Фотография расположения оптических волокон при вертикальном вводе излучения в дифракционную решётку на поверхности чипа ФИС

Список литературы

1. Handbook of Silicon Photonics / ed. by L Pavesi, V. Vivien. CRC Press, 2013.
2. Jin Z. et al. // Photonics Res. 2024. V. 12. No. 3. P. 465.
3. Dell'Olio F., et al. // J. Eur. Opt. Soc. Rapid Publ. 2014. V. 9. P. 14013.
4. Wang J., et al. // Nat. Photonics. 2020. V. 14. No. 5. P. 273-284.
5. Voronkov G.S., et al. // Nanomaterials. 2023. V. 13. No. 1. P. 193.

УДК 535(06)+004(06)

Р.С. СТАРИКОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ФОТОННЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ ДЛЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ: ОБЗОР

Представлен обзор новейших реализаций фотонных интегральных устройств для радиотехнических систем различного назначения.

R.S. STARIKOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

PHOTONIC INTEGRATED CIRCUITS FOR RADIOENGENEERING SYSTEMS: A REVIEW

An overview of the newest implementations of photonic integrated devices for various purposes radioengineering systems is presented

Разработка методов создания фотонных интегральных схем (ФИС) – активно развивающееся направление оптических технологий, в наше дни вступающее в период появления прототипов и экспериментальных образцов практичных устройств.

При построении фотонных интегральных схем требуется одновременное выполнение нередко взаимопротиворечащих требований, а именно: желательно иметь возможность реализации как активных (лазеры, модуляторы, фотодетекторы) так и пассивных (волноводы, разветвители, фильтры) фотонных компонентов в едином гибридном либо монолитном исполнении, при этом должна быть обеспечена возможность интеграции с высокоскоростными электронными устройствами и СВЧ-элементами. В настоящее время в мире исследуются и разрабатываются возможности реализации ФИС на базе нескольких технологических платформ – Si, Si_3N_4, InP, $LiNbO_3$, практика показывает, что до настоящего времени ни одна из них не удовлетворяет полностью вышеуказанным требованиям. Тем не менее, начиная с середины 2010-х годов, появляются сведения о серийных продуктах интегральной фотоники, на настоящий момент лидерами рынка оборудования для информационных технологий освоено производство ФИС, в частности, приёмопередающих модулей для систем цифровой связи со скоростью 400 Гбит/с и выше с мультиплексированием с разделением по длине волны, строящихся по кремниевой технологии.

Принципиальные достоинства ФИС – широкополосность, устойчивость к электромагнитным помехам и энергоэффективность привлекательны и при решении актуальных задач построения радиотехнических систем различного назначения. Успешная демонстрация в 2010-х годах возможностей микроволновой фотоники при создании ряда экспериментальных аналого-цифровых систем, базировавшихся на дискретных фотонных компонентах, обусловила рост числа исследований по созданию ФИС для задач передачи и обработки широкополосных и сверхширокополосных радиосигналов. В настоящий момент имеется определённость в требованиях с точки зрения качества сигнала, с которыми функционируют ФИС, по отношению сигнал/шум, свободному динамическому диапазону и рабочей полосе частот, а также с точки зрения аналого-цифрового преобразования и цифровой обработки выходного сигнала ФИС.

В работе кратко охарактеризовано современное состояние технологий интегральной фотоники. Рассмотрены основные актуальные возможности и проблемы создания элементов ФИС, обсуждаются их достижимые характеристики, отдельно рассмотрены возможности создания пассивных элементов, приводятся примеры реализации и/или применения модуляторов, рассматриваются варианты применения лазерных источников света в ФИС и возможности интеграции ФИС с фотодетекторами и с электронными устройствами. Проведён обзор новейших реализаций ФИС для радиотехнических систем различного назначения. Рассмотрены опубликованные примеры и результаты экспериментальной апробации и практических испытаний действия фотонных интегральных устройств в составе функционирующих экспериментальных широкополосных и сверхширокополосных радиотехнических систем. Рассмотрены устройства различного функционального назначения, том числе предназначенные для передачи аналоговых сигналов по оптоволокну, для формирования СВЧ-сигналов, для задач построения изображений в системах радиолокаторов с синтезированной апертурой, для выполнения аналого-цифрового преобразования СВЧ-сигналов. Отмечены продемонстрированные технические возможности создания сверхширокополосных и многодиапазонных систем перечисленных типов, работающих с сигналами диапазонов до 40 ГГц и выше, а также перспективы создания многодиапазонных радиотехнических систем на основе ФИС.

Обзор основан на анализе литературных источников, опубликованных с 2020 года по настоящее время.

УДК 535(06)+004(06)

С.М. ПОПОВ, О.В. БУТОВ[1], А.А. РЫБАЛТОВСКИЙ[2],
Д.В. РЯХОВСКИЙ, Д.С. ЛИПАТОВ[3], Ю.К. ЧАМОРОВСКИЙ
Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
[1]*Институт радиотехники и электроники РАН им. В.А. Котельникова, Москва*
[2]*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*
[3]*Институт химии высокочистых веществ РАН, Нижний Новгород*

ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ОДНОЧАСТОТНЫЙ СЛУЧАЙНЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР, РАБОТАЮЩИЙ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

Описывается перестраиваемый «случайный» волоконный лазер с резонатором на основе эрбиевого оптического волокна с массивом волоконных брэгговских решёток, записанных в процессе вытяжки оптического волокна с использованием чирпированной фазовой маски. Полученная перестраиваемая лазерная генерация в области длин волн в 1546 - 1548 нм при накачке на длине волны 976 нм с эффективность 10 % и шириной линии около 1 кГц.

S.M. POPOV, O.V. BUTOV[1], A. A. RYBALTOVSKII[2],
D.V. RYAKHOVSKII, D.S. LIPATOV[34], Yu.K. CHAMOROVSKIY
Fryazino branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS
[1]*Kotelnikov Institute of Radiengineering and Electronics of the RAS, Moscow*
[2]*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*
[3]*Institute of Chemistry of High-Purity Substances of the RAS, Nizhny Novgorod*

TUNABLE SINGLE FREQUENCY FIBER RANDOM LASER OPERATING IN THE TELECOMMUNICATIONS WAVELENGTH RANGE

A tunable "random" fiber laser with a resonator based on an erbium-doped optical fiber with an array of fiber Bragg gratings inscribed during the optical fiber drawing process using a chirped phase mask is described. The resulting tunable laser generation in the wavelength range of 1546 - 1548 nm under pumping at a wavelength of 976 nm with a slope efficiency of 10 % and a linewidth of about 1 kHz.

Новым направлением исследований в области фотоники являются так называемые «случайные» волоконные лазеры, где обратная связь достигается за счёт рассеяния Рэлея, а усиление за счёт эффектов рассеяния Рамана [1] или ВРМБ [2]. Ранее нами была получена одночастотная лазерная генерация на длине волны 1548 нм в оптическом

волокне (ОВ), легированном ионами эрбия с резонатором из массива волоконных брэгговских решёток (ВБР), состоящим из 600 отражателей (общая длина резонатора 6 метров) с эффективностью около 30 % и шириной линии около 550 Гц [3]. Запись массива ВБР происходит во время процесса вытяжки ОВ с помощью эксимерного УФ-лазера работающего на длине волны 248 нм. В данной работе перестраиваемая лазерная генерация получена с использованием так называемой «полуоткрытой» конфигурации [4]: состоящей из массива ВБР и сильноотражающей ВБР (90 % на длине волны 1546 нм – фемтосекундная технология). Массив ВБР записан с использованием чирпированной фазовой маски (с переменным периодом) – 1070 … 1073 нм длиной 10 мм. Это даёт отражение в области длин волн 1546 - 1550 нм величиной 10^{-3} м$^{-1}$. Перестройка лазера в области длин волн 1546 … 1548 нм и более достигается с помощью растяжения сильноотражающей ВБР с помощью специального стрейчера (рис. 1). Ширина спектра генерации, измеренная методом автогетеродинирования, – около 1 кГц см (рис. 2). Диаметр сердцевины/оболочки ОВ – 9/125 мкм, длина волны отсечки – 900 нм, длина резонатора – 3 м (300 ВБР). Эффективность лазерной генерации при длине волны накачки 976 нм составляет величину 10 %. Максимальная выходная мощность в одночастотном режиме – 1,2 мВт.

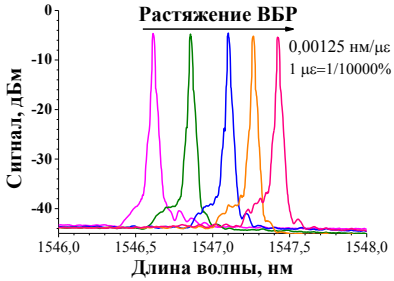


Рис. 1. Зависимость длины волны лазерной генерации от растяжения 90 % ВБР.

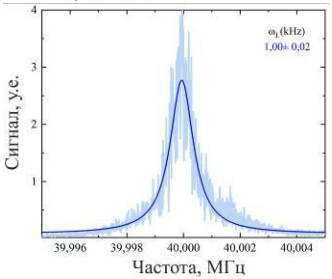


Рис. 2. Радиочастотный спектр лазерного излучения

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Работа А.А. Рыбалтовского и Д.С. Липатова поддержана проектом РНФ № 22-19-00511.

Список литературы

1. Turitsyn S.K., Babin S.A., et al. // Nature Photonics. 2010. V. 9. P. 231.
2. Fotiadi A.A. // Nature Photonics. 2010. V. 4. P. 204.
3. Popov S.M., Butov O.V., et al. // Photonics. 2023. V. 10. P. 748.
4. Zhang W.L., Rao Y.J., et.al. // Opt. Express 2012, V. 20, P. 14400.

УДК 535(06)+004(06)

Э.М. ГАФУРОВ, С.А. ФИЛАТОВА, В.А. КАМЫНИН,
В.Б. ЦВЕТКОВ
Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

ГОЛЬМИЕВЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ, ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ В СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ 2070 - 2095 нм

Проведены исследования режимов генерации ультракоротких импульсов в полностью волоконном гольмиевом лазере. Были определены полная дисперсия резонатора и временной джиттер на разных длинах волн генерации. Перестройка центральной длины волны генерации осуществлялась за счёт подстройки состояния поляризации.

E.M. GAFUROV, S.A. FILATOVA, V.A. KAMYNIN,
V.B. TSVETKOV
Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

ULTRA-SHORT PULSE HOLMIUM-DOPED FIBER LASER TUNABLE IN THE SPECTRAL RANGE OF 2070 - 2095 nm

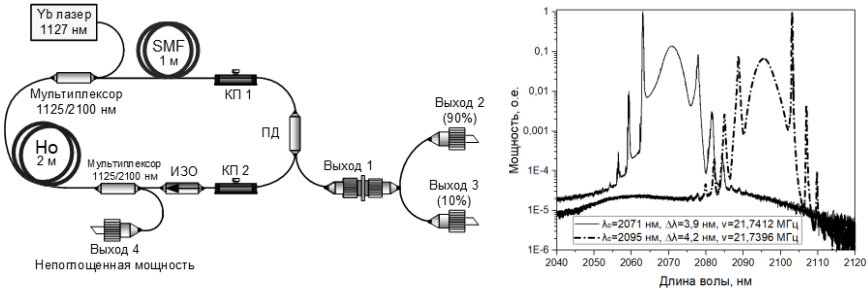
This study presents investigations on ultrashort pulsed generation regimes in an all-fiber holmium laser. The net cavity dispersion and temporal jitter were determined at different wavelengths of generation. Tuning of the central generation wavelength was achieved by adjusting the polarization state.

Волоконные лазеры, генерирующие ультракороткие импульсы (УКИ) в коротковолновом инфракрасном (ИК) диапазоне спектра (1,6 - 2,5 мкм), благодаря преимуществам полностью волоконной конструкции, стали незаменимым инструментом в промышленности, науке, медицине и других отраслях. [1]. Целью данной работы являлось создание и исследование характеристик полностью волоконного гольмиевого (Ho^{3+}) лазера, работающего в режиме пассивной синхронизации мод, основанной на эффекте нелинейной эволюции поляризации [2].

Гольмиевый волоконный лазер был собран по кольцевой схеме (рис. 1*а*). В схеме использовали: иттербиевый (Yb^{3+}) волоконный лазер накачки (λ = 1227 нм), два мультиплексора, работающих на длинах волн 1125/2100 нм (один для ввода излучения накачки в резонатор, а другой для вывода непоглощённой мощности накачки), изолятор (ИЗО), задающий направление распространения излучения по часовой стрелке, гольмиевое

волокно (2 м), одномодовое волокно (1 м). Для реализации нелинейной эволюции поляризации в схеме резонатора использован поляризационный делитель (ПД) на основе волокна с сохранением состояния поляризации и пара контроллеров поляризации (КП). Вывод излучения осуществлялся через ПД.

Изменение состояния поляризации за счёт подстройки КП приводило к перестройке центральной длины волны излучения λ_c, а соответственно к незначительному изменению частоты следования импульсов, различимому на радиочастотном анализаторе спектра. На рис. 1*б* представлена перестройка центральной длины волны излучения с 2071 до 2095 нм. На спектрах видны боковые пики Келли, характерные для солитонного режима работы лазера [3], по которым можно рассчитать полную дисперсию ($\beta_2 L$) резонатора.



а *б*

Рис. 1. Схема кольцевого гольмиевого лазера: SMF – одномодовое волокно, Но – гольмиевое волокно, ИЗО – оптический изолятор, ПД – поляризационный делитель, КП1 и КП2 – контроллеры поляризации (*а*); перестройка центральной длины волны для двух стабильных солитонных режимов генерации (*б*)

При перестройке центральной длины волны генерации было зафиксировано незначительное изменение частоты следования импульсов с 21,7412 МГц на длине волны 2071 нм на 21,7396 МГц на длине волны 2095 нм (рис. 1*б*). При этом средняя мощность излучения на выходе 1 находилась в диапазоне от 8,1 до 12,5 мВт, а длительность импульсов находилась в диапазоне от 1,04 до 1,14 пс.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-72-10120, https://rscf.ru/project/24-72-10120/.

Список литературы

1. Guoqing C., et al. // iScience. 2020. V. 23. No. 5. P. 101101.
2. Kirsch D.C., et al. // J. Appl. Phys. 2020. V. 128. No. 18. P. 180906.
3. Kelly S.M. // Electronics Letters. 1992. V. 28 (8). P. 806-807.

УДК 535(06)+004(06)

С.В. ЧИРКОВ[1,2], Н.Н. СМОЛЯНИНОВ[1], В.Д. ЕФРЕМОВ[1],
А.А. АНТРОПОВ[1], Д.С. ХАРЕНКО[1,2]
[1]*Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск*
[2]*Новосибирский государственный университет*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБЛАСТИ СУЩЕСТВОВАНИЯ РЕЖИМА СИНХРОНИЗАЦИИ МОД В ВОЛОКОННОМ ЛАЗЕРЕ НА ЭФФЕКТЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ЭВОЛЮЦИИ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Экспериментально изучены области самозапуска и существования режима синхронизации мод в иттербиевом волоконном лазере на эффекте нелинейной эволюции поляризации. Выявлены закономерности в поведении мощности ультракоротких импульсов и их оптического спектра как функций параметров контроллера поляризации. Показана повторяемость параметров излучения от запуска к запуску.

S.V. CHIRKOV[1,2], N.N. SMOLYANINOV[1], V.D. EFREMOV[1],
A.A. ANTROPOV[1], D.S. KHARENKO[1,2]
[1]*Institute of Automation and Electrometry of Siserian Branch of the RAS, Novosibirsk*
[2]*Novosibirsk State University*

EXPERIMENTAL STUDY OF THE AREA OF A STABLE MODE-LOCKING REGIME IN A FIBER LASER BASED ON THE NONLINEAR POLARIZATION EVOLUTION

The areas of self-starting and existence of the mode-locking regime in an ytterbium fiber laser based on the effect of nonlinear polarization evolution are investigated experimentally. Similarities in the behavior of the output radiation power and its optical spectrum are revealed. Run-to-run repeatability of the radiation parameters is shown.

Синхронизация мод может быть достигнута с помощью эффекта керровской линзы, амплитудных или частотных модуляторов, различных типов насыщающихся поглотителей [1]. Для волоконных систем характерно использование присущих только им искусственных насыщающихся поглотителей, например, поглотителей на основе нелинейного петлевого зеркала [2] или эффекта нелинейной эволюции поляризации (НЭП) [3], для которого характерна возможность изменения параметров в широких диапазонах [4]. Такие системы просты в реализации, обладают высокой оптической стойкостью и невысокой

стоимостью в сравнении с другими методами. Однако они зачастую чувствительны к внешним возмущениям в виде вибраций или изменения температуры окружающей среды, что усложняет процесс их настройки. В данной работе проведено детальное исследование как самозапуска режима синхронизации мод, так и эффекта гистерезиса для волоконного лазера на эффекте НЭП, что является её принципиальным отличием от других работ по схожей тематике. Кроме того, уникальной является сама конструкция иттербиевого лазера, включающая в себя волокно преимущественно с сохранением поляризации, узкополосную брэгговскую решётку с большой аномальной дисперсией и электронный контроллер поляризации (ЭКП).

Выходное излучение лазера имеет линейную поляризацию с центром спектра на длине волны 1030 нм в одноимпульсном режиме синхронизации мод и обладает шириной спектра порядка 0,1 нм, что достигается за счёт баланса нелинейного и дисперсионного фазовых набегов, возникающих при прохождении элементов резонатора. Управление поведением излучения осуществляется с помощью изменения тока диода накачки и состояния трёхканального ЭКП, имитирующего действие волновых пластинок. В ходе экспериментов была исследована область самозапуска стабильной импульсной генерации, где обнаружено плавное изменение таких параметров как ширина оптического спектра и выходная мощность. Также, была исследована область существования режима синхронизации мод, в которой обнаружено возникновение узкого пика в оптическом спектре по мере удаления от точки запуска при практически неизменной энергии. Это свидетельствует о перекачке энергии из импульсного излучения в непрерывное и подтверждается уменьшением амплитуд импульсов. Был предложен, метод повышения воспроизводимости при повторных запусках лазера как качественных, так и количественных мощности излучения, значений ширины оптического спектра и координаты его центра.

В результате работы показано существенное различие областей самозапуска и существования стабильного режима генерации, а полученные зависимости говорят о возможности реализации его непрерывного контроля. Работа выполнена при поддержке госзадания ИАиЭ СО РАН, проект № FWNG-2024-0015.

Список литературы

1. Svelto O. Principles of Lasers, 4th ed. Springer, New York, 2010.
2. Fermann M.E., Harberl F., et al. // Opt. Lett. 1990.V. 15. P. 752-754.
3. Hofer M., Fermann M.E., et al. // Opt. Lett. 1991. V. 16. P. 502-504.
4. Bednyakova E., Kharenko D.S., Yarovikov A.P. // JOSA B. 2020. V. 37. P. 2763-2767.

УДК 535(06)+004(06)

С.М. ПОПОВ, А.А. РЫБАЛТОВСКИЙ[1], Д.В. РЯХОВСКИЙ,
Д.С. ЛИПАТОВ[2], О.Н. ЕГОРОВА[1], Ю.К. ЧАМОРОВСКИЙ
Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
[1]Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва
[2]Институт химии высокочистых веществ РАН, Нижний Новгород

ОДНОЧАСТОТНЫЙ СЛУЧАЙНЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР, РАБОТАЮЩИЙ В L-ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

Работа посвящена созданию «случайных» волоконных лазеров расширенного телекоммуникационного диапазона (L-диапазон) на основе массивов волоконных брэгговских решёток. записанных в процессе вытяжки активных оптических волокон. Получена одночастотная лазерная генерация с эффективностью ~ 16 % на длине волны 1587,5 нм при накачке на длине волны 974,5 нм.

S.M. POPOV, A.A. RYBALTOVSKII[1], D.V. RYAKHOVSKII,
D.S. LIPATOV[2], O.N. EGOROVA[1], Yu.K. CHAMOROVSKIY
Fryazino branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS
[1]Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow
[2]Institute of Chemistry of High-Purity Substances of the RAS, Nizhny Novgorod

SINGLE FREQUENCY FIBER RANDOM LASER OPERATING IN L-BAND RANGE

The work is devoted to the creation of "random" fiber lasers of the so-called extended telecommunication range (L-range) based on arrays of fiber Bragg gratings inscribed in the process of drawing active optical fibers. Single longitudinal mode laser operation at the wavelength of 1587,5 nm with a slope efficiency of ~ 16 % is obtained under pumping at the wavelength of 974,5 nm.

Последнее время стала актуальной задача создание источников излучения в так называемом расширенном телекоммуникационном диапазоне (более 1570 нм – L-диапазон) [1]. Это актуально для задач когерентной рефлектометрии [2] (одновременный мониторинг ВОЛС и передача данных) и зондирование газов [3] с пиками поглощения, длина волны которых превышает 1600 нм (этилен, метан и другие). Для создания таких источников требуются среды имеющее усиление в данном диапазоне длин волн. Ранее нами была получена так называемая «случайная» лазерная генерация на длине волны 1673 нм с

использованием оптических волокон (ОВ), легированных ионами висмута, и массивов волоконных брэгговских решёток (ВБР), записанных в процессе вытяжки оптического волокна (ОВ) [4]. В данной работе получена лазерная генерация с использованием ОВ с составом сердцевины $Er_2O_3/GeO_2/Al_2O_3/P_2O_5/SiO_2$. Массив ВБР в этом ОВ был записан в процессе вытяжки ОВ эксимерным лазером, работающим на длине волны 248 нм и фазовой маской с периодом 1098,4 нм. Длина резонатора –5 м и состоит из 500 ВБР. Полученный массив ВБР имеет пиковую отражательную способность около 5 % с центром вблизи 1588 нм. Измеренное значение усиления и поглощения слабого сигнала ОВ на длине волны ~ 1588 нм – 4,5 и 2,3 дБ/м, соответственно. Диаметр сердцевины/оболочки ОВ – 9/125 мкм. Разность показателей преломления сердцевины и оболочки ОВ – 0,006, а длина волны отсечки ~ 0,95 мкм. Непрерывная лазерная генерация была обнаружена с одним узким пиком на длине волны 1587,5 нм и шириной ~ 0,02 нм (рис. 1). При накачке на длине волны 974,5 нм достигнута выходная мощность лазера 16 мВт при дифференциальной эффективности 16 %. Излучение лазера было исследовано с помощью сканирующего интерферометра Фабри–Перо Vitawave SCC-750 (рис. 2). Был выявлен режим генерации на одной продольной моде и двух ортогонально-поляризованных модах резонатора.

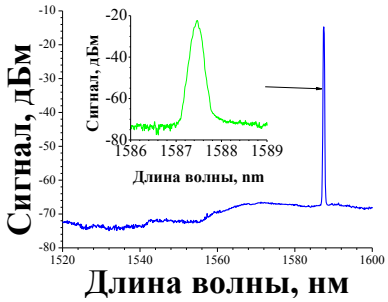


Рис. 1. Спектр лазерной генерации

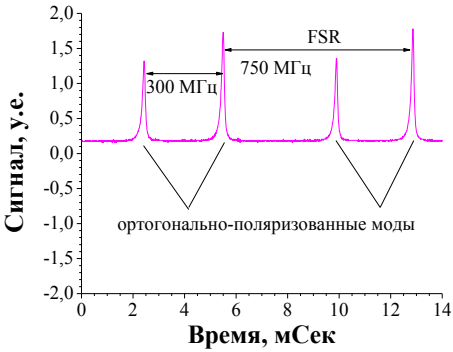


Рис. 2. Интерферограмма излучения

Работа поддержана проектом РНФ № 22-19-00511.

Список литературы

1. Guanyu Ye., et al. // Opt. Lett. 2023. V. 48. P. 4729-4732.
2. Shatalin S.V., et al. // Applied Optics. 1998. V. 37. P. 5600-5604.
3. Zhang T., et al. // J. of App. Spec. 2020. V. 87. P. 674-679.
4. Kharakhordin A.V., Rybaltovsky A.A., et al. //J. of Lightwave. Tech. 2023. V. 41, P. 6362.

К.А. ГАЛЮК, Л.В. ГАФУРОВА, А.А. СИРОТКИН,
Б.Д. ОВЧАРЕНКО, В.Х. БАГДАСАРОВ
Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

ЛАЗЕРНЫЕ 3 мкм ИСТОЧНИКИ С ПОПЕРЕЧНОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

Разработаны лазеры с излучением в области 3 мкм на основе высокоэффективного лазерного модуля (квантрона) с поперечной диодной накачкой на активных элементах с ионами эрбия Er. Проведено сравнение энергетических характеристик квантронов с тремя различными кристаллами: Er:YLF, Er:YAG, Er:YSGG. Методом математического моделирования проведена оптимизация геометрии накачки лазерного модуля. Измерены выходные характеристики (энергия, мощность и эффективность работы) разработанных прототипов лазерных источников, работающих в режимах свободной генерации и пассивной и активной модуляции добротности.

K.A. GALYUK, L.V. GAFUROVA, A.A. SIROTKIN,
B.D. OVCHARENKO, V.Kh. BAGDASAROV
Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

LASER 3 μm SOURCES WITH TRANSVERSE DIODE PUMPING

Lasers with emission in the 3 μm region based on a high-efficiency laser module (quantron) with transverse diode pumping on active elements with Erbium ions have been developed. The energy characteristics of quantrons with three different crystals: Er:YLF, Er:YAG, Er:YSGG have been compared. Optimization of the pumping geometry of the laser module has been carried out by mathematical modelling method. The output characteristics (energy, power, and efficiency) of the developed prototype laser sources operating in the modes of free generation and passive and active modulation of goodness-of-fit have been measured.

В настоящее время лазерные источники на основе твердотельной активной среды с длиной волны излучения в спектральной области около 3 мкм имеют широкую сферу применения (обработка материалов (создание наноструктур), биомедицина, оптическая накачка лазерных сред [1, 2]). Создание твердотельных лазеров с оптической поперечной накачкой должно позволить решить задачу эффективной генерации импульсного излучения в рассматриваемой спектральной области.

В данной работе для эффективной генерации излучения на длинах волн в окрестности 3 мкм использовались активные среды Er:YLF, Er:YAG, Er:YSGG. В программном пакете ZEMAX проведено математическое моделирование с последующей оптимизацией геометрии оптической накачки активного элемента с целью повышения эффективности накачки. Численно рассчитано пространственное распределение мощности поглощённого излучения накачки в поперечном сечении активного элемента и определена эффективность накачки.

С целью верификации результатов математического моделирования квантрона проведены эксперименты по определению выходных характеристик лазерных систем. Рассмотрены следующие режимы работы лазерной системы:

- свободная генерация;
- активная модуляции добротности (с помощью акустооптического модулятора на кристалле KGW);
- пассивная (на кристалле ZnSe:Fe) модуляции добротности.

Достигнуты максимальные значения энергии 2,2 Дж в режиме свободной генерации и 1 Дж в цуге импульсов. Измерена временная форма цуга (длительностью до 1 мс) одиночных импульсов с характерной длительностью каждого импульса порядка 10 - 100 нс.

На основе результатов эксперимента и моделирования в программе Rezonator проведена оценка фокусного расстояния термической линзы активной среды.

Список литературы

1. Migal E., Pushkin A., et al. // Opt. Lett. 2019. V. 44 (8). P. 2550-2553.
2. Акимов В.А., Воронов А.А. и др. // Квантовая электроника. 2006. Т. 36 (4). С. 299-301.

УДК 535(06)+004(06)

Д.А. ТАРВАНЕН
АО «ЛЛС», Санкт-Петербург

ПРИМЕНЕНИЕ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРОВ В КВАНТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ, ПРЕЦИЗИОННОЙ МЕТРОЛОГИИ И ТЕРАГЕРЦОВОЙ ОПТИКЕ

Фемтосекундные лазеры с их ультракороткими импульсами длительностью порядка фемтосекунд (10^{-15} с) произвели революцию в нескольких направлениях науки и техники. В этой работе показаны применения фемтосекундных лазеров в трёх областях: квантовые технологии, прецизионная метрология и терагерцовая оптика. Предложены актуальные решения фемтосекундных лазеров, а также оптических гребёнок со стабилизацией частоты следования импульсов, длины волны и фазы.

D.A. TARVANEN
SC LLS, Saint-Petersburg

APPLICATION OF FEMTOSECOND LASERS IN QUANTUM TECHNOLOGIES, PRECISION METROLOGY AND TERAHERTZ OPTICS

Femtosecond lasers with their ultrashort pulses of femtosecond (10^{-15} s) duration have revolutionized several areas of science and technology. This paper presents applications of fs lasers in three areas: quantum technologies, precision metrology, and terahertz optics. The paper proposes current solutions for fs lasers and optical combs including pulse repetition rate, wavelength, and phase stabilization.

Оптический стандарт частоты требует ультрастабильных по частоте излучения лазерных источников, которые способны разрешать сверхузкие резонансные атомные переходы, типичная ширина которых обычно составляет сотни кГц. Для достижения этого требуется активная стабилизация. Один из способов достижения этого – сравнить выходную частоту лазера с опорной и преобразовать полученное смещение между ними в электрический сигнал, который затем служит обратной связью для параметров управления лазером. Высокая стабильность достигается путём привязки оптической частотной гребёнки к стабилизированной длине волны, тем самым стабилизируя каждую из линий гребенки [1]. Линии гребёнки, в свою очередь, служат в качестве эталона для других лазеров, участвующих в конкретном эксперименте.

Фемтосекундные оптические гребёнки широко используются в интерферометрических методиках для прецизионного измерения расстояния. Относительная точность таких измерений лучше, чем 10^{-7} [2]. Такая точность измерений осуществима даже для больших расстояний в воздухе, если используется оптимальная спектральная ширина линии.

Гребёнки терагерцовой частоты могут выступать не только в статусе инструмента точного измерения частоты, но и играть важную роль в таких приложениях, как спектроскопия терагерцового диапазона (THz-DCS) [3]. Здесь уменьшение частоты позволяет линейно увеличивать временную шкалу последовательности терагерцового импульса в диапазоне радиочастот, где спектроскопические сигналы с шириной линии до килогерц могут быть измерены напрямую. Существующие системы на основе двух оптических гребёнок обычно используют стабилизированные фемтосекундные лазеры для наивысшей производительности.

Список литературы

1. Prehn A., et al. Fast, precise, and widely tunable frequency control of an optical parametric oscillator referenced to a frequency comb // Review of Scientific Instruments. 2017. V. 88. No. 3.

2. Balling P., et al. Femtosecond frequency comb based distance measurement in air // Optics Express. 2009. V. 17. No. 11. P. 9300-9313.

3. Hu G.? et al. Dual terahertz comb spectroscopy with a single free-running fibre laser // Scientific Reports. 2018. V. 8. No. 1. P. 11155.

УДК 535(06)+004(06)

Т.А. ДИК[1], Г.Э. РИЗАЕВ[2,3], Д.В. ПУШКАРЕВ[2,3], А.В. КОРИБУТ[1,2], М.В. ЛЕВУСЬ[2,3], Л.В. СЕЛЕЗНЕВ[2,3]

[1]*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный*

[2]*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

[3]*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ ПРИ ФИЛАМЕНТАЦИИ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Экспериментально зарегистрирована генерация второй гармоники при фемтосекундной филаментации лазерного излучения ближнего ИК-диапазона в воздухе. Измерены энергия и поляризация второй гармоники в зависимости от параметров лазерного импульса.

T.A. DICK[1], G.E. RIZAEV[2,3], D.V. PUSHKAREV[2,3], A.V. KORIBUT[1,2], M.V. LEVUS[2,3], L.V. SELEZNEV[2,3]

[1]*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny*

[2]*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

[3]*Lomonosov Moscow State University*

SECOND HARMONIC GENERATION DURING FILAMENTATION OF FEMTOSECOND LASER PULSES

Second harmonic generation is experimentally observed during femtosecond filamentation of near-IR laser radiation in air. The dependence of second harmonic energy and polarization on the laser pulse parameters is measured.

Изменение характеристик среды за счёт распространения в ней лазерного излучения может приводить к режиму, в котором импульс распространяется вдоль тонкого канала – филамента [1]. В плазме лазерного филамента происходит генерация гармоник. В случае изотропной среды генерация чётных гармоник наблюдаться не должна. Нечётные гармоники, например третья, регистрируются в эксперименте, коэффициент преобразования лазерного излучения составляет порядка 10^{-3} [2]. В нашей работе экспериментально зарегистрировано излучение второй гармоники, генерируемого в плазме лазерного филамента. Коэффициент преобразования составил 10^{-9}.

Эксперимент проводился на титан-сапфировой лазерной системе с центральной длиной волны 950 нм, длительностью импульса 90 фс и энергией до 10 мДж. Пучок диаметром около 1 см (по уровню 1/e) с горизонтальной поляризацией проходил через дифракционный ослабитель и фокусировался с помощью различных линз. За областью филаментации для отсечения основной частоты находились дихроичные зеркала и светофильтр СЗС22. Далее с помощью линзы излучение фокусировалось в щель спектрометра. Путем интегрирования сигналов по спектру, измерялась энергия второй гармоники при различных параметрах лазерного импульса.

Пример получаемых спектров второй гармоники представлен на рис. 1. Измерения зависимости энергии второй гармоники от энергии лазерного импульса проводились при разных фокусировках, результаты которых приведены в виде графика на рис. 2. Отсутствие на графике точек с энергией более 6 мДж обусловлено наличием в этом случае большой погрешности, связанной с влиянием конической эмиссии. При увеличении жесткости фокусировки увеличивается энергия второй гармоники. Также обнаружено изменение длины волны максимума второй гармоники в пределах нескольких нанометров.

Работа выполнена при поддержке РНФ, грант № 24-19-00461.

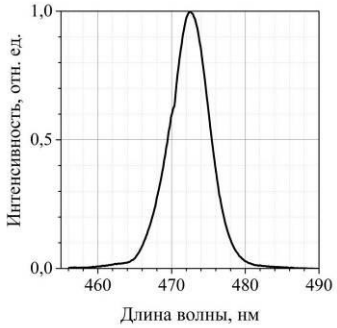


Рис. 1. Спектр второй гармоники

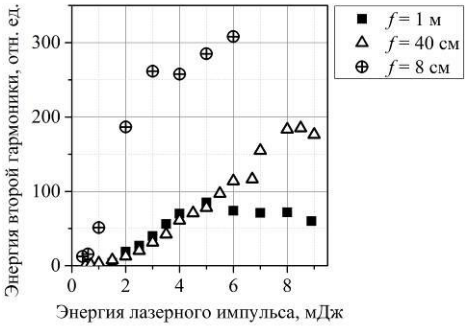


Рис. 2. Зависимость энергии второй гармоники от энергии лазерного импульса при различных фокусировках лазерного пучка

Список литературы

1. Couairon A., Mysyrowicz A.. Femtosecond filamentation in transparent media // Physics reports. 2007. V. 441. No. 2-4. P. 47-189.

2. Ionin A.A., et al. Third Harmonic Generation by Ultrashort Laser Pulses Tightly Focused in Air // Laser Physics. 2011 V. 21 No. 3. P. 500-504.

М.Н. ЕРШКОВ, А.Е. ШЕПЕЛЕВ[1], С.А. СОЛОХИН
Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева
[1]Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ КОМПАКТНОГО ЛАЗЕРА С КОМПОЗИТНЫМ Nd^{3+}:YAG / Cr^{4+}:YAG КЕРАМИЧЕСКИМ ЭЛЕМЕНТОМ

Представлены результаты исследований генерации лазера на базе композитного элемента из отечественной Nd^{3+}:YAG / Cr^{4+}:YAG керамики. Средняя мощность генерации составила 4.2 Вт при дифференциальном кпд 28.6 % и общей эффективности 24 %. Максимальная энергия импульса составила 70.5 мкДж при длительности 4.5 нс.

M.N. ERSHKOV, A.E. SHEPELEV[1], S.A. SOLOKHIN
Kovrov State Technological Academy named after V.A. Degtyarev
[1]Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs

INVESTIGATION OF THE GENERATION OF A COMPACT LASER WITH A COMPOSITE Nd^{3+}:YAG / Cr^{4+}:YAG CERAMIC ELEMENT

The results of the laser generation research based on a composite Nd^{3+}:YAG / Cr^{4+}:YAG national ceramic element are presented. The average generation power was 4.2 W with a slope efficiency of 28.6 % and a total efficiency of 24 %. The maximum pulse energy was 70.5 μJ with a duration of 4.5 ns.

Компактные твердотельные лазеры на основе керамических активных элементов представляют значительный интерес для решения различных научных и практических задач. Отдельный интерес представляют полностью керамические композитные Nd^{3+}:YAG / Cr^{4+}:YAG лазеры, способные генерировать импульсы мегаваттного уровня мощности [1 - 3].

Целью данной работы является экспериментальное исследование параметров генерации твердотельного лазера на базе композитного элемента, изготовленного из отечественной Nd^{3+}:YAG / Cr^{4+}:YAG керамики. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Композитный элемент *1* состоял из активной части длиной 9 мм, активированной Nd^{3+} с концентрацией 1 ат. %, и пассивной части длиной 3 мм, активированной Cr^{4+} с концентрацией 0.1 ат. %. Начальное пропускание Cr^{4+}:YAG составляло около 80 %. Резонатор длиной 15 см

был образован входным *2* и выходным *3* плоскими зеркалами. Входное зеркало имело пропускание 93 % на длине волны 0.808 мкм и отражение 100 % на длине волны 1.064 мкм. В качестве выходного использовали зеркала с отражением R_{out} = 45, 65, 77 и 84 % на длине волны 1.064 мкм. Накачка осуществлялась с помощью лазерного диода *4* с выходной мощностью излучения до 25 Вт на длине волны 0.808 мкм и числовой апертурой NA = 0.22. Излучение накачки фокусировалось в центр активного элемента в пятно диаметром 500 мкм с помощью объектива *5* с фокусным расстоянием 10 см. В ходе эксперимента исследовались энергетические и временные параметры лазерного излучения.

На рис. 2 представлены зависимости средней мощности лазерного излучения от поглощённой мощности накачки при различных значениях отражения выходного зеркала.

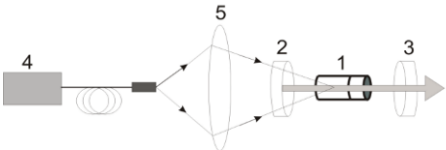


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

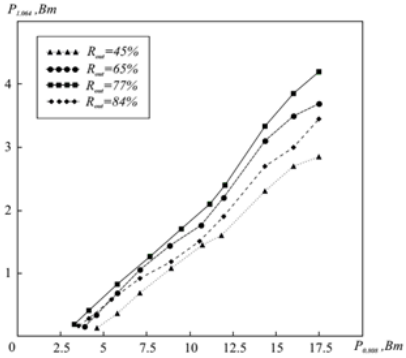


Рис. 2. Зависимости средней мощности излучения от поглощённой мощности накачки

Наибольшая мощность излучения составила 4.2 Вт при использовании выходного зеркала с R_{out} = 77 %. Дифференциальный кпд в данном случае составил 28.6 % при общей эффективности генерации 24.0 %. Длительность импульса составила 4.6 нс при частоте следования импульсов 61.7 кГц. Расходимость лазерного излучения составила 33 мрад.

Список литературы

1. Pavel N., Tsunekane M., Taira T. // Opt. Express. 2011, V. 19 (10). P. 9378.
2. Sandu O., Salamu G., et al. // Quantum Electronics. 2012. V. 43 (3). P. 211.
3. Lim H.H., Taira T. // Opt. Express. 2022. V. 30 (4). P. 5151.

УДК 535(06)+004(06)

Ю.А. СИНИЧКИНА[1,2], М.В. ГОРБУНКОВ[1], В.С. ЕРМАКОВ[2], Ю.Я. МАСЛОВА[1]

[1]*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*
[2]*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА СВЕТОВЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ОСНОВЕ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ЛАЗЕРА С МУЛЬТИГИГАГЕРЦОВОЙ ЧАСТОТОЙ СЛЕДОВАНИЯ И ХАОТИЧЕСКИМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ АМПЛИТУДЫ

Рассмотрена реализация синхронизированного с внешним сигналом высокочастотного хаотического генератора световых импульсов на основе твердотельного лазера.

Yu.A. SINICHKINA[1,2], M.V. GORBUNKOV[1], V.S. ERMAKOV[2], Yu.Ya. MASLOVA[1]

[1]*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*
[2]*Bauman Moscow State Technical University*

SIMULATION OF A LIGHT PULSE GENERATOR BASED ON A SOLID-STATE LASER WITH MULTIGIGAHERTZ REPETITION RATE AND A CHAOTIC AMPLITUDE DISTRIBUTION

The implementation of a high-frequency chaotic generator of light pulses synchronized with an external signal based on a solid-state laser is considered.

Системы с управляемой хаотической динамикой находят всё большее применение в различных областях науки и техники. Новые методы, разрабатываемые для широкополосных систем связи, ставят задачу создания быстрых, простых и надежных генераторов хаотических последовательностей импульсов света [1 - 4]. Интерес к хаотическим генераторам света возникает и в различных задачах биологии, фундаментальной и практической медицины [5].

В нашей работе предложен метод, который объединяет режим стирания памяти и гармоническую синхронизацию мод и позволит создать синхронизированный с внешним сигналом хаотический генератор световых импульсов на основе твердотельного лазера с мультигигагерцовой частотой следования.

Предлагаемая схема такого лазера представлена на рис. 1. Для повышения частоты следования мы предлагаем воспользоваться элементами волоконной оптики на основе двойного модулятора Маха-Зендера, предназначенного для модуляции излучения на частотах в десятки гигагерц [6].

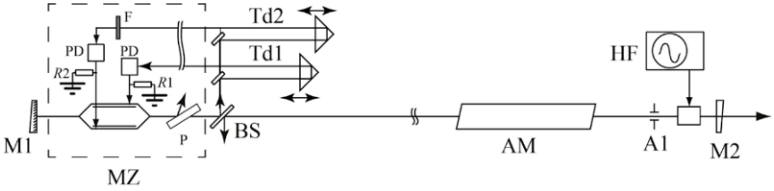


Рис. 1. Схема генератора световых импульсов с мультигигагерцовой частотой следования и хаотическим распределением амплитуды: M1, M2 – зеркала резонатора, F – нейтральный светофильтр, R1, R2 – сопротивления, Td1, Td2 – задержки, PD – фотодиод, BS – светоделительная пластинка, P – поляризатор, AM – активная среда (bulk или активное волокно), A1 – диафрагма, HF – высокочастотный генератор, MZ – система обратной связи на основе волоконных модуляторов Маха-Зендера

Численные расчёты были проведены с помощью комплекса программ, основанного на последовательном преобразовании интенсивности лазерного излучения с учётом действия активной среды и электрооптического модулятора.

Показано, что применение волоконных технологий существенно повышает частоту хаотической последовательности, а переход на полностью волоконные технологии позволит создать компактное устройство с возможностью продвижения частоты в диапазон ≥ 10 ГГц.

Список литературы

1. Colet P., Roy R. // Opt. Lett. 1994. V. 19. P. 2056.
2. Larger L., Goedgebuer J.-P. // C.R. Physique. 2004. V. 5. P. 609.
3. Suneel M. // Sadhanā. 2006. V. 31. P. 69-78.
4. Pareek N.K., Patidar V., Sud K.K. // Phys. Lett. A. 2003. V. 309. P. 75-82.
5. Kacher C.M., Klima H., Kratky K.W. Suppressive influence of periodic and chaotic laser light on cancer cells. International // Journal of Modelling, Identification and Control. 2008. V. 5. No. 3. P. 214-220.
6. Афанасьев В.М., Пономарев Р. С. Электрооптические амплитудные модуляторы Маха–Цендера на основе ниобата лития, их модификации и форматы модуляции // Прикладная фотоника. 2017. Т. 4. № 4. С. 337-360.

Д.В. МОРОЗОВ[1,2], А.К. ВОРОБЬЕВ[1,2], В.И. ПАВЛОВ[1],
И.И. СТЕПАНОВ[1,2], Д.А. ЧЕРМОШЕНЦЕВ[1,2,3], И.А. БИЛЕНКО[1,4]
[1]*Российский квантовый центр, Сколково*
[2]*Московский физико-технически институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный*
[3]*Сколковский институт науки и технологий*
[4]*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОПТИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ

Проводится экспериментальное измерение коэффициентов керровской и тепловой нелинейности для оптических интегральных микрорезонаторов из нитрида кремния Si_3N_4. Выявлено, что коэффициент тепловой нелинейности может в несколько раз превосходить коэффициент керровской нелинейности.

D.V. MOROZOV[1,2], A.K. VOROBYEV[1,2], V.I. PAVLOV[1],
I.I. STEPANOV[1], D.A. CHERMOSHENTSEV[1,2,3], I.A. BILENKO[1,4]
[1]*Russian Quantum Center, Skolkovo*
[2]*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny*
[3]*Skolkovo Institute of Science and Technology*
[4]*Lomonosov Moscow State University*

MEASUREMENT OF OPTICAL NONLINEARITY COEFFICIENTS OF INTEGRATED MICRORESONATORS

We experimentally measure Kerr and thermal nonlinearity coefficients for optical integrated silicon nitride Si_3N_4 microresonators. It is revealed that thermal nonlinearity coefficient may be several times higher than Kerr nonlinearity coefficient.

Оптические интегральные кольцевые микрорезонаторы (МР) из нитрида кремния Si_3N_4 находят широкое применение в нелинейной фотонике за счёт высокой добротности $Q \sim 10^5 - 10^7$, малого модового объёма и низкого порога параметрической генерации [1]. Известно, что на нелинейные процессы, протекающие в МР, существенное влияние оказывает тепловой разогрев МР за счёт поглощения излучения, с характерным временем релаксации $\tau_{тепл} \geq 1$ мкс [1, 2]. Зависимость показателя преломления от интенсивности излучения в МР определяется коэффициентами как керровской, так и тепловой нелинейности:

$$\delta n = (n_2 + n_{2\tau})I \qquad (1)$$

где δn – изменение показателя преломления, I – интенсивность излучения, n_2 и $n_{2\tau}$ – коэффициенты керровской и тепловой нелинейности. При этом для быстрых изменений интенсивности, происходящих с характерным временем $\tau << \tau_{тепл}$, коэффициент $n_{2\tau}$ стремится к нулю. Таким образом, коэффициенты n_2 и $n_{2\tau}$ могут быть определены в эксперименте с использованием медленной $\tau >> \tau_{тепл}$ и быстрой $\tau << \tau_{тепл}$ модуляции интенсивности в МР. Экспериментальная установка для измерения коэффициентов n_2 и $n_{2\tau}$ представлена на рис. 1а. Длина волны лазера сканируется с периодом τ в окрестности резонансной моды МР ($\lambda_0 \approx 1540$ нм). Для различных значений интенсивности излучения с помощью эталонного интерферометра Маха-Цендера измеряется спектральное смещение резонансной частоты $\delta\omega_0$ (рис. 1б). Соответствующее изменение показателя преломления определяется из:

$$\delta\omega_0 / \omega_0 = -\delta n / n_g \qquad (2)$$

где $\delta\omega_0$ – резонансная частота, $\delta\omega_0$ – спектральное смещение резонансной частоты, n_g – групповой показатель преломления.

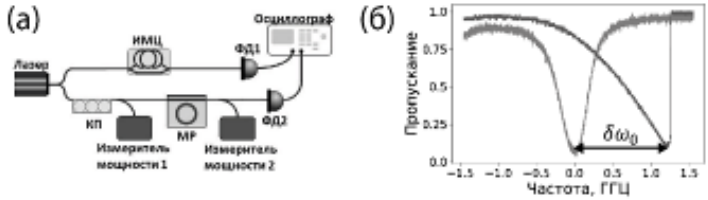


Рис. 1. Экспериментальная установка: ИМЦ – интерферометр Маха-Цендера, ФД – фотодетектор, КП – контроллер поляризации, МР – микрорезонатор (а); смещение резонансной частоты за счёт нелинейной зависимости показателя преломления от интенсивности (б)

Исследовался МР со следующими параметрами: радиус 50 мкм $Q = 0.6 \cdot 10^6$, спектральная ширина резонансной кривой 268 МГц. В результате проведения двух серий измерений с использованием медленной ($\tau >> \tau_{тепл}$) и быстрой ($\tau << \tau_{тепл}$) перестройки частоты лазера были получены следующие значения коэффициентов оптической нелинейности: $n_2 = 2.0 \cdot 10^{-19}$ м^2/Вт, $n_{2\tau} = 17.0 \cdot 10^{-19}$ м^2/Вт.

Данная работа была поддержана Госкорпорацией «Росатом» в рамках Дорожной карты по квантовым вычислениям (Договор № 868-1.3-15/15-2021 от 5 октября 2021).

Список литературы

1. Gao M., Yang Q.F., et al. // Nature Communications. 2022. V. 13. P. 3323.
2. Lobanov V.E. // J. Exp. Theor. Phys. 2023. V. 137. P. 603-614.

УДК 535(06)+004(06)

А.Д. ПАТОЛЯТОВ[1], Д.А. КОЛЫМАГИН[1],
А.Г. ВИТУХНОВСКИЙ[1,2]
[1]*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный*
[2]*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

ПОЛИМЕРНЫЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ПРЕЛОМЛЯЮЩИЕ ЛИНЗЫ ДЛЯ ФОКУСИРОВКИ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Предложен подход к изготовлению полимерных цилиндрических преломляющих линз с помощью технологии двухфотонной полимеризации (2PP) с апертурой 200 мкм и фокусным расстоянием 1 м. Уделено внимание оптимальной конструкции линз и времени их создания. Также проведено компьютерное моделирование с целью анализа размера пучка в фокальной области и выявления нежелательных эффектов при реальном использовании цилиндрических рентгеновских линз.

A.D. PATOLYATOV[1], D.A. KOLYMAGIN[1], A.G. VITUKHNOVSKII[1,2]
[1]*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny*
[2]*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

POLYMER CYLINDRICAL REFRACTIVE LENSES FOR FOCUSING SYNCHROTRON RADIATION

An approach to the manufacture of polymer cylindrical refractive lenses using two-photon polymerization (2PP) technology with an aperture of 200 microns and a focal length of 1 m is proposed. Attention is paid to the optimal design of lenses and the production time. Computer modeling was also carried out to analyze the beam size in the focal area and identify undesirable effects when using cylindrical X-ray lenses in real life.

В настоящее время идет активное развитие методов и инструментов фокусировки рентгеновского излучения, в частности получаемого с помощью синхротронных источников [1]. Одним из таких методов с относительно малым фокусным расстоянием и достаточно высокой светосилой является фокусировка с помощью составных (стек) преломляющих рентгеновских линз (СПРЛ) [2].

Данная работа посвящена созданию полимерной [3] линзы с апертурой 200 мкм и фокусным расстоянием единичной линзы из стека линз 10 м

(рис. 1), предварительному анализу параметров фокального пятна. Оптимизируя одну линзу, можно составить стек и варьируя число линз в стеке и добиться нужного положения фокального пятна

Линзы изготавливались методом двухфотонной лазерной полимеризации. Использовался когерентный фемтосекундный титан-сапфировый лазер с частотой импульсов 80 МГц и длиной волны 780 нм [4]. Предложен оптимальный подход к изготовлению преломляющих цилиндрических рентгеновских линз, учитывающий необходимое качество их формы и сокращающий время печати на 20 % (рис. 2).

Проведены исследования оптического хода лучей через линзу и оценены параметры фокального пятна толщиной 1.3 мкм при при фокусировке синхротронного излучения с энергией 10 кэВ [5]. Подтвердилась высокая эффективность линз параболического профиля, исключающего сферические аберрации.

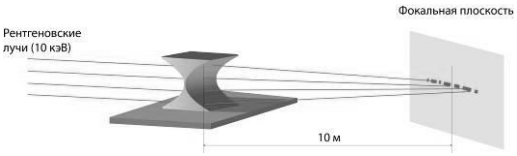


Рис. 1. Преломление рентгеновского излучения одинарной полимерной одномерной преломляющей рентгеновской линзой

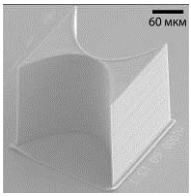


Рис. 2. Снимок в микроскопе полимерной одномерной преломляющей рентгеновской линзы

Список литературы

1. Safonov A.I., et al. // Crystallography Reports. 2024. V. 69 (4). P. 609-619.

2. Barannikov A., Polikarpov, et al. // Journal of Synchrotron Radiation. 2019. V. 26 (3). P. 714-719.

3. Pentaerythritol triacrylate | C14H18O7 | CID 19042 // [PubChem, 22 August 2024 г] https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Pentaerythritol-triacrylate

4. Patolyatov A.D., Shcherbakov, et al. // Physics of Wave Phenomena. 2022. V. 30 (5). P. 325-329.

5. Huang C., Mu B., et al. // Proc. of SPIE. 2009. V. 7451. P. 233-241.

УДК 535(06)+004(06)

С.В. БОРИТКО, А.Ф. НАУМОВ
Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

ОДНА ИЗ ПРИЧИН, ПРИВОДЯЩАЯ К РАЗМЫТИЮ СПЕКТРОВ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ

Исследованы выходные характеристики наиболее эффективной системы накачки твердотельных лазеров (полупроводниковой), основанной на лазерных диодных линейках. Определен пространственный профиль излучения конкретных диодных линеек. Показано, что основной причиной, приводящей к изменению спектральных характеристик лазерного излучения, являются наведённые термические эффекты, связанные с пространственной неоднородностью излучения системы полупроводниковой накачки.

S.V. BORITKO, A.F. NAUMOV
Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow

ONE OF THE REASONS LEADING TO THE RAMAN SPECTRA BLURRING

The output characteristics of the most efficient solid-state laser pumping system (semiconductor) based on laser diode arrays are investigated. The spatial profile of the specific diode array radiation is measured. It is shown that one of the reasons leading to a change in the spectral characteristics of laser radiation are induced thermal effects associated with the spatial inhomogeneity of the semiconductor pumping system radiation.

Мотивация. В НТЦ УП РАН были изготовлены несколько рамановских спектрометров, в комплект которых в качестве источников излучения входили твердотельные лазеры с полупроводниковой накачкой. При тестировании спектрометров на одном тестовом объекте для одного из них линии комбинационного рассеяния "искажались". При смене источника излучения спектр восстанавливался. Встал вопрос: в чем возможная причина искажения и насколько в этом виновата система полупроводниковой накачки используемого твердотельного лазера.

Эксперимент. В качестве объекта исследований была выбрана диодная линейка, предназначенная для накачки активного элемента, извлеченная из системы, показавшей неудовлетворительные спектральные характеристики комбинационного рассеяния. При проведении экспериментов использовался спектрометр-флюариметр, созданный на

основе двухкристального акустооптического монохроматора [1]. Передача излучения от диодной линейки к спектрометру осуществлялась по оптическому волокну, что существенно уменьшало влияние паразитного внешнего излучения.

В первую очередь была исследована интенсивность излучения накачки на длине волны 810 нм (частота максимальной интенсивности излучения диодов, составляющих линейку) в разных точках по длине линейки. Оказалось, что, во-первых, спектры излучения всех элементов линейки схожи, и, во-вторых, значения максимумов излучения в разных точках по длине линейки практически одинаковы. Затем, были проведены исследования пространственного распределения максимума излучения линейки, то есть в зависимости от угла отклонения от вертикали. Оказалось, что картина распределения излучения несимметрична, причём максимум излучения направлен под углом порядка 10 ° к вертикали.

Таким образом выявлено – исследованная диодная линейка обладает несимметричным в пространстве распределением излучения. Рассмотрим, к чему это приводит. Пусть имеется идеальный активный элемент и осуществляется накачка по всей его боковой поверхности. Известно, что даже для иттербиевых лазеров, у которых полосы поглощения и люминесценции достаточно близки, около 11 % мощности накачки трансформируется в тепло (для неодимовых лазеров этот показатель достигает 37 %). Следовательно, если излучение накачки несимметрично в пространстве, то одна часть активного элемента по поперечному сечению будет получать больше световой энергии, что приведет к локально неравномерному нагреву активного элемента. Это в свою очередь приведет к возникновению в нем термических эффектов [2, 3]. В связи с этим незначительно изменяется вид спектральной характеристики излучения лазера и, как следствие, искажается картина комбинационного рассеяния.

Результаты работы получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН (НТЦ УП РАН) [НТИРФ ID: 456451, https://ckp.ntcup.ru/].

Список литературы

1. Мазур М.М., Шорин В.Н., Абрамов А.Ю. и др. Спектрометр с двойным оптическим монохроматором // Оптика и спектроскопия. 1996. Т. 81. № 3. С. 521.

2. Тарасов Л.В. Физика лазера. 2-е изд. М.: Либроком, 2010.

3. Шестаков А. Оптические элементы // Фотоника. 2007. № 5. С. 30.

УДК 535(06)+004(06)

Е.Ю. ЗЛОКАЗОВ, М.И. КАЗЬМИН, В.А. НЕБАВСКИЙ,
Д.А. ТРЕТЬЯКОВ, Р.С. СТАРИКОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

РАДИОФОТОННАЯ СИСТЕМА ПЕРЕНОСА СВЧ-ПОЛОСЫ

В работе обсуждаются важнейшие особенности фотонных систем переноса полосы. Представлены результаты работы простейших экспериментальных макетов аналоговых оптических трактов, предназначенных для переноса полосы обрабатываемого сигнала.

E.Yu. ZLOKAZOV, M.I. KAZMIN, V.A. NEBAVSKIY,
R.S. STARIKOV, D.A. TRETYAKOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

MICROWAVE PHOTONIC SYSTEMS OR BASEBAND CONVERSION

The paper discusses the most important features of photonic baseband conversion systems. The results of the work of the simplest experimental models of analog optical link intended for transferring the band of the processed signal are presented.

В настоящее время имеется значительное количество примеров удачного, в том числе коммерчески успешного, использования технологий микроволновой фотоники при построении радиотехнических систем различного назначения – от ФАР до 6G. Широкая рабочая полоса по входу, низкие потери и электромагнитная совместимость элементной базы микроволновой фотоники делает особенно привлекательной задачу построения системы переноса полосы частот обрабатываемого сигнала.

При разработке схем переноса полосы частот важность достижения высоких значений метрик оценки качества работы системы обычно ниже, нежели её экономическая эффективность или массогабаритные параметры; это в значительной степени определяется задачей. К основным метрикам оценки качества работы систем переноса полосы частот можно отнести:

- Коэффициент передачи или преобразования,
- Свободный динамический диапазон,
- Рабочая полоса частот,
- Динамический диапазон по усиления,
- Коэффициент шума

Реализация интегральных систем переноса полосы частот, предъявляет высокие требования с точки зрения их конструктивной сложности. Поэтому для практических задач, исследования простых систем из доступной компонентной базы являются особенно актуальными.

В настоящей работе представлена (рис. 1) фотонная система переноса полосы СВЧ-сигнала на базе аналогового оптического СВЧ-тракта, состоящая из коммерчески доступных компонентов: лазера с прямой модуляцией, модулятора Маха–Цендера, фотодиода, фильтра нижних частот. Представлены (рис. 2) результаты экспериментов по измерению сигналов, а также обсуждаются особенности функционирования системы.

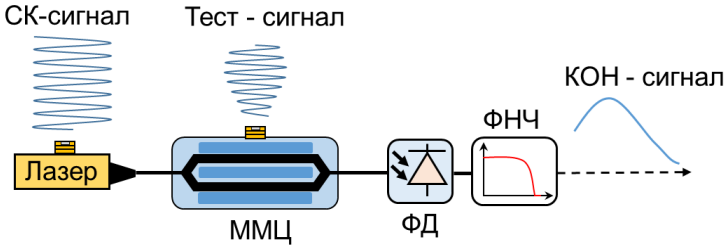


Рис. 1. Схема СВЧ-АОТ для переноса несущей частоты сигнала: ММЦ – модулятор Маха–Цендера, СК-сигнал – сканирующий сигнал (гетеродин), ФД – фотодиод, ФНЧ – фильтр нижний частот, КОН-сигнал – конвертированный сигнал

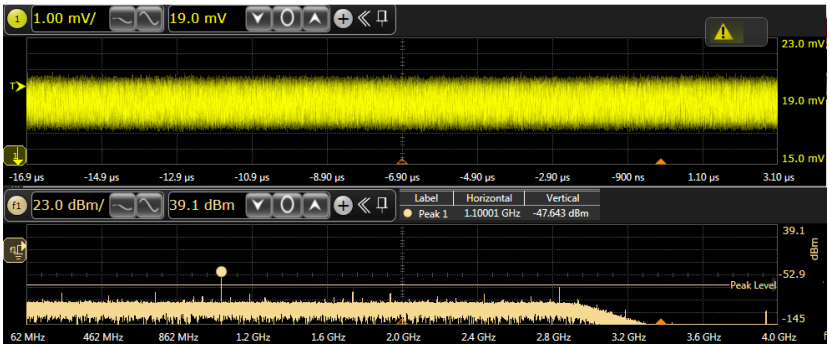


Рис. 2. Осциллограмма (сверху) и спектр (снизу) конвертированного сигнала, полученного переносом тестового сигнала с частотой 5.1 ГГц с помощью сканирующего сигнала с частотой 4 ГГц

Работа выполнена при поддержке РНФ, грант № 24-19-00898.

УДК 535(06)+004(06)

В.В. ЮШИЦЫНА, Т.И. КОЛИНЬКО, Е.В. ТРИФОНОВА, А.П. ПЛЁНКИН
Южный федеральный университет, Таганрог

НЕСТАНДАРТНАЯ ТОПОЛОГИЯ КВАНТОВО-КРИПТОГРАФИЧЕСКОЙ СЕТИ

Проанализирована возможность создания пространственно-разнесенной сети на основе автокомпенсационной системы квантового распределения ключей с автоматической компенсацией фазовых изменений. Приведена схема участка квантово-криптографической сети нестандартной топологии, в которой последовательно расположены одна передающая станция и несколько приемных. Рассмотрен алгоритм поиска оптического сигнала в процессе синхронизации с учётом ряда оптических ответвителей в квантовом канале связи. Показано, что наличие мощного оптического импульса в процессе калибровки является уязвимостью, которая позволяет получить несанкционированный доступ к квантовому каналу. Предложено решение, позволяющее повысить защищённость алгоритма синхронизации путем контроля уровня оптического излучения.

V.V. YUSHITSYNA, T.I. KOLINKO, E.V. TRIFONOVA, A.P. PLJONKIN
Southern Federal University, Taganrog

NON-STANDARD TOPOLOGY OF A QUANTUM-CRYPTOGRAPHIC NETWORK

The paper describes the operating principle of an autocompensation quantum key distribution system with automatic compensation of phase changes. A diagram of a section of a quantum-cryptographic network of non-standard topology is given, in which one transmitting station and several receiving stations are in series. An algorithm for searching for an optical signal during synchronization is considered, considering several optical couplers in a quantum communication channel. It is shown that the presence of a powerful optical pulse during calibration is a vulnerability that allows unauthorized access to the quantum channel. A solution is proposed that allows increasing the security of the synchronization algorithm by using controlled optical radiation.

Сети квантовых коммуникаций сегодня сводятся к эффективному применению систем квантового распределения ключей. В таких сетях простейшей топологией является «точка-точка». В такой конфигурации квантовые ключи распределяются между двумя пользователями [1]. При проектировании сетей смешанной топологии возникает множество

препятствий. Например, протяжённые волоконно-оптические линии связи вносят существенное затухание и не позволяют передавать слабый оптический сигнал на большие расстояния без его усиления. Наиболее распространённым решением при построении сложных квантовых сетей является использование доверенных узлов. В Китае по такому принципу построена сеть протяжённостью в тысячи километров, охватывающая десятки городов [2]. Реализованные системы квантовой связи, как правило, имеют схожий принцип действия и ряд компонентов [3]. Всегда есть оптические лавинные фотодиоды, источник оптического излучения, интерферометры, фазовые модуляторы, поляризационные фильтры.

Целью работы является исследование конфигурации участка квантовой сети с двухпроходной схемой квантового распределения ключей [4]. Особенностью схемы является то, что в ней лавинные фотодиоды, источник излучения и интерферометр Маха–Цендера расположены в одной станции (отправителя). В такой системе одна станция отправителя соединена с тремя станциями получателей последовательно одним оптическим волокном. Удобство такой схемы заключается в том, что все технологически сложные элементы расположены в одном модуле (корпусе) отправителя. При построении квантовых сетей такая конфигурация может быть востребована, когда требуется распределять ключи между базовой станцией и пользователями. Отметим, что в подобных схемах наиболее эффективным является использование квантового протокола BB84 и его модификаций с фазовым или поляризационным кодированием. Технически нет очевидных препятствий использования одной базовой станции для осуществления синхронизации с тремя удаленными станциями. Естественно, с точки зрения работы квантового протокола, все станции должны быть связаны аутентичным общедоступным каналом, но для процесса калибровки этого не требуется. Предложено техническое решение для синхронизации сети квантовых коммуникаций нестандартной конфигурации, отличающееся наличием одной приёмо-передающей станции и трёх пространственно-разнесенных кодирующих станций.

Работа выполнена при поддержке ИКТИБ ЮФУ и Pljonkins inc.

Список литературы

1. Румянцев К.Е. Квантовая коммуникация: теория, эксперименты, приложения // В кн. «Информационно–телекоммуникационные и компьютерные технологии, устройства и системы в Южном федеральном университете. Ростов н/Д: Изд–во ЮФУ, 2010. С. 213-247.

2. Chen Y.A., et al. s // Nature. 2021.V. 589. No. 7841. P. 214-219.

3. Pljonkin A., Singh P.K. // 5 Intern. Conf. on Parallel, Distributed and Grid Computing. P. 795-799.

4. Pljonkin A., Petrov D., Sabantina L., Dakhkilgova K. // Entropy. 2021. V. 23. P. 509.

УДК 535(06)+004(06)

И.М. ФИЛИПОВ, В.В. ЧИСТЯКОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ГЕТЕРОДИННЫЙ ПРИЁМ ЗА СЧЁТ ПОВТОРНОЙ ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИИ ДЛЯ СИСТЕМ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧА НА НЕПРЕРЫВНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ НА БОКОВЫХ ЧАСТОТАХ

В работе представлен метод гетеродинного приёма за счёт повторной фазовой модуляции в блок получателя на смещённой частоте. Метод позволяет осуществлять когерентный приём многомодовых фазово-модулированное состояний на боковых частотах, используемого в системах квантового распределения ключа на непрерывных переменных на боковых частотах. Получена аналитическая зависимость выхода балансного детектора от фазы модулированного сигнала для данного метода детектирования, а также проведено сравнение выхода с методом детектирования за счёт спектрального разделения боковых частот и гетеродинного приёма за счёт взаимодействия с локальным осциллятором на светоделителе. Проведена экспериментальная проверка представленного метода с различными промежуточными частотами.

I.M. FILIPOV, V.V. CHISTYAKOV
ITMO University, Saint-Petersburg

HETERODYNE DETECTION SCHEME BASED ON PHASE MODULATION IN RECEIVER SIDE FOR SUBCARRIER WAVE CONTINUOUS VARIABLE QUANTUM KEY DISTRIBUTION

Heterodyne detection method was suggested which based on receiver's phase modulation for subcarrier wave modulated signal. The method appears to allow performing coherent detection for multimode subcarrier wave states utilized in subcarrier wave continuous variable quantum key distribution systems. An analytical dependence was obtained for the balanced detector output in case of proposed method. Additionally, this output was compared with the heterodyne detection method based on 180 degree hybrid and the detection method based on spectral separation of subcarriers. Proof-of-concept experiments was conducted for various intermediate frequencies.

В рамках работы предлагается новый метод гетеродинного детектирования многомодовых когерентных состояний на боковых частотах фазово-модулированного излучения, который не имеет ограничения снизу частоты модуляции из-за спектральной фильтрации,

что характерно для схемы, описанной в [1, 2]. Предлагаемая схема гетеродинного детектирования представлена на рис. 1. Основной особенностью является смещение частоты электрического сигнала при повторной фазовой модуляции в блоке получателя.

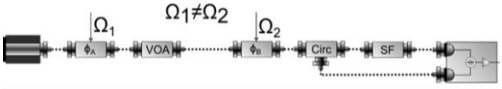


Рис. 1. Предложенная схема гетеродинного детектирования

Выход балансного детектора для предложенного метода детектирования можно описать формулой:

$$V(t) = GE_0^2(1 - J_0^2(m(t))),$$

где G – усиление преобразования, E_0 – амплитуда поля, J_0 – функция Бесселя первого рода нулевого порядка, m – эффективный индекс модуляции, описываемый формулой:

$$m(t) = \sqrt{m_A^2 + m_B^2 + 2m_A m_B \cos(\Delta\omega t - \varphi_A + \varphi_0)}.$$

На рис. 2 приведён график сравнения выходов гетеродинного детектирования для одинаковой промежуточной частоты в случае гетеродинного детектирования за счёт 3 дБ светоделителя [4], и метода на основе спектрального разделения [1, 2] и предложенного метода детектирования.

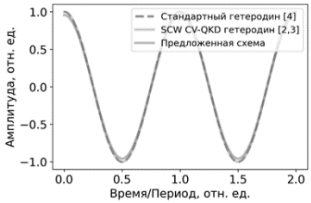


Рис. 2. Сравнение выхода балансного детектора для различных методов гетеродинного детектирования

Список литературы

1. Samsonov E., et al. Coherent detection schemes for subcarrier wave continuous variable quantum key distribution // JOSA B. 2021. V. 38. No. 7. –P. 2215-2222.

2. Goncharov R.K., et al. Heterodyne-based subcarrier wave quantum cryptography under the chromatic dispersion impact // Наносистемы: физика, химия, математика. 2021. Т. 12. № 2. С. 161-166.

3. Su Z., et al. Experimental demonstration of phase-sensitive multimode continuous variable quantum key distribution with improved secure key rate // Photonics Research. 2023. V. 11. No. 11. P. 1861-1869.

УДК 535(06)+004(06)

С.Б. БЫЧКОВ, И.С. КОРОЛЁВ, С.В. ТИХОМИРОВ
Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва

КЛЮЧЕВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОДНОФОТОННЫХ ИСТОЧНИКОВ И ПРИЁМНИКОВ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В КВАНТОВО-КРИПТОГРАФИЧЕСКИЭХ СИСТЕМАХ

В работе рассматриваются ключевые параметры источников одиночных фотонов и однофотонных фотодетекторов, которые могут оказывать влияние на производительность систем квантовой криптографии и описывается установка для их исследования.

S.B. BUCHKOV, I.S. KOROLEV, S.V. TIKHOMIROV
All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements, Moscow

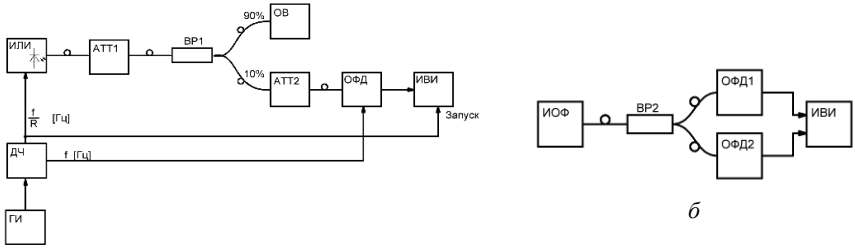
KEY PARAMETERS OF SINGLE-PHOTON SOURCES AND DETECTORS OF OPTICAL RADIATION IN QUANTUM CRYPTOGRAPHIC SYSTEMS

The report examines the key parameters of single photon sources and single-photon photodetectors that can affect the performance of quantum cryptography systems and describes the metrological setup for their research.

Развитие волоконно-оптических систем передачи информации ставит новые задачи, одной из которых является защита информации от несанкционированного доступа. Это привело к появлению оптических квантовых криптографических систем, позволяющих реализовать каналы связи, защищённые одноразовым секретным ключом. При этом доказательство секретности ключа базируется на принципе неопределенностей Гейзенберга. Важной частью систем квантового распределения ключа (КРК) являются однофотонные фотодетекторы (ОФД) и источники одиночных фотонов (ИОФ).

Знание квантовой эффективности и вероятностей ложных срабатываний ОФД является необходимым при проектировании систем КРК, так как от них в значительной степени зависят максимальное расстояние безопасной передачи и скорость выработки секретного ключа. Для ИОФ основной особенностью является генерация сепарированных во времени одиночных фотонов. В ФГБУ «ВНИИОФИ» была разработана и

собрана установка, предназначенная для определения характеристик ОФД и ИОФ, позволяющая измерять характеристики ОФД в соответствии с рекомендациями Европейского института телекоммуникационных стандартов ETSI GS QKD 011 V1.1.1 [1]. Схема установки показана на рис. 1*а*.



а *б*

Рис. 1. Схема установки для исследования характеристик ОФД и ИОФ: квантовой эффективности и вероятностей ложных срабатываний ОФД (*а*) и схема совпадений для исследования ИОФ (*б*)

Излучение импульсного лазера ИЛИ ослабляется при помощи аттенюаторов АТТ1 и АТТ2. Средняя мощность контролируется при помощи ваттметра ОВ через разветвитель ВР1. ИЛИ запускается генератором импульсов ГИ, через делитель частоты ДЧ в R раз реже, чем исследуемый ОФД получает строб-сигнал. ИЛИ, АТТ1 и АТТ2 образуют источник псевдоодночастотных импульсов, излучение с которого подаётся на ОФД. Сигнал с ОФД регистрируется измерителем временных интервалов ИВИ. Применяемые методы позволяют вычислить вероятности верных и ложных срабатываний разных типов ОФД и квантовую эффективность на длине волны излучателя ИЛИ. На рис. 1*б* представлена схема совпадений, используемая для доказательства однофотонности излучения на выходе ИОФ. Излучение ИОФ не должно вызывать синхронного срабатывания детекторов ОФД1 и ОФД2. Разработанные установки позволили провести исследования характеристик различных ОФД и ИОФ для нужд метрологического обеспечения систем КРК.

Список литературы

1. ETSI GS QKD 011 ETSI GS QKD 011 V1.1.1 (2016-05) Quantum Key Distribution (QKD). Component characterization: characterizing optical components for QKD systems.

2. Бычков С.Б., Королёв И.С., Тихомиров С.В., Борисова А.В. Измерения квантовой эффективности однофотонных фотодетекторов с учётом вероятностей темнового счёта и послеимпульсов для задач метрологического обеспечения квантово-криптографических систем // Фотон-экспресс. 2022. № 4 (180). С. 11,

УДК 535(06)+004(06)

Б.А. НАСЕДКИН[1], А.О. ИСМАГИЛОВ[1], Е.Н. ОПАРИН[1],
А.А. ГАЙДАШ[1,2], А.Н. ЦЫПКИН[1], А.В. КОЗУБОВ[1,2]
[1]*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*
[2]*Математический институт им. В.А. Стеклова РАН, Москва*

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ВОЗМОЖНОСТЬ РЕАЛИЗАЦИИ АТАКИ «ТРОЯНСКИЙ КОНЬ» НА СИСТЕМЫ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ

Приведены экспериментальные результаты измеренных зависимостей пропускания волоконно-оптических элементов от температуры нагрева. Продемонстрировано, что нагрев волоконно-оптических элементов может приводить к появлению уязвимостей систем квантового распределения ключей, которые могут быть использованы для эффективной реализации атаки «троянский конь».

B.A. NASEDKIN[1], A.O. ISMAGILOV[1], E.N. OPARIN[1],
A.A. GAIDASH[1,2], A.N. TCYPKIN[1], A.V. KOZUBOV[1,2]
[1]*ITMO University, Saint-Petersburg*
[2]*Steklov Mathematical Institute of the RAS, Moscow*

THE IMPACT OF OPTICAL ELEMENTS TEMPERATURE ON THE FEASIBILITY OF IMPLEMENTING «TROJAN HORSE» ATTACK IN QUANTUM KEY DISTRIBUTION SYSTEMS

Experimental results of measured dependences of fiber-optic elements transmission on heating temperature are presented. It is demonstrated that heating of fiber-optic elements can lead to the emergence of vulnerabilities in quantum key distribution systems, which can be used for effective implementation of the «Trojan horse» attack.

Передача информации при помощи систем квантового распределения ключей (КРК) защищена на уровне фундаментальных законов физики. Однако, в виду неидеальности оборудования, используемого для практической реализации данных систем, могут существовать сторонние каналы утечки информации. Такие каналы могут быть использованы нарушителем для извлечения формируемых между отправителем и получателем битовых последовательностей. Более того, каналы утечки могут активно создаваться нарушителем путём воздействия лазерным излучением. Среди подходов к созданию сторонних каналов утечки

информации стоит выделить подходы, эффективность которых зависит от спектральных характеристик используемых волоконно-оптических элементов [1 - 3]. Такие подходы называются атаками на техническую реализацию систем КРК. В настоящее время при анализе устойчивости систем КРК против атак на техническую реализацию, температурные зависимости не учитываются [4].

Целью данной работы является демонстрация необходимости учёта температурных зависимостей волоконно-оптических элементов, входящих в состав исследуемой системы КРК, для уточнения границы количества информации, доступной нарушителю. В качестве примера спектрально-зависимой атаки на техническую реализацию рассматривалась атака «троянский конь».

Для определения величины вносимых потерь исследуемых волоконно-оптических элементов, была собрана экспериментальная установка, состоящая из широкополосного источника излучения (СК), климатической камеры (КК), в которую помещались исследуемые волоконно-оптические элементы (ТЭ) и спектроанализатора (СА). Схема представлена на рис. 1.

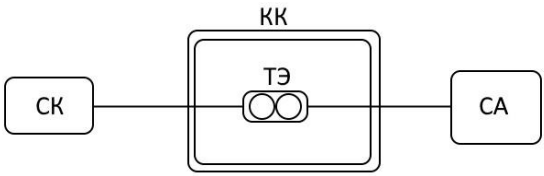


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

В результате были получены спектры пропускания волоконно-оптических элементов в диапазоне температур 25 -90 °С и диапазоне длин волн 1250 - 1650 нм. Данные спектры были использованы для оценки мощности излучения, доступной нарушителю при реализации атаки «троянский конь» на систему КРК аналогично подходу, представленному в работе [5]. Однако, используемые уравнения модернизировались в части учёта температурной зависимости.

Список литературы

1. Jain N., et al. // IEEE Journal of STQE. 2014. V. 21 (3). P. 168-177.
2. Shi Y. et al. // Optics express. 2017. V. 25 (24). P. 30388-30394.
3. Han L. et al. // Phys. Rev. Appl. 2023. V. 20 (4). P. 044013.
4. Борисова А.В. и др. // Оптика и спектроскопия. 2020. Т. 128 (11). С. 1758-1766.
5. Nasedkin B., et al. // Phys. Rev. Appl. 2023. V. 20 (1). P. 014038.

УДК 535(06)+004(06)

В.В. ГРИШАЧЕВ
Российский государственный гуманитарный университет, Москва

МОДЕЛЬ УГРОЗ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМ СИСТЕМАМ ПЕРЕДАЧИ С ЗАЩИТОЙ НА ОСНОВЕ КВАНТОВОЙ КРИПТОГРАФИИ

Модель угроз безопасности систем связи с квантовым распределением ключей построена с учётом технических и организационных уязвимостей, которые дополняют угрозы атак на волоконно-оптический квантовый канал.

V.V. GRISHACHEV
Russian State University of the Humanities, Moscow

A MODEL OF INFORMATION SECURITY THREATS TO FIBER-OPTIC TRANSMISSION SYSTEMS WITH PROTECTION BASED ON QUANTUM CRYPTOGRAPHY

The model of security threats to communication systems with quantum key distribution is built taking into account technical and organizational vulnerabilities that complement the threats of attacks on the fiber-optic quantum channel.

Одно из наиболее перспективных направлений обеспечение конфиденциальности передачи информации связывается с криптографической защитой путём обмена ключами через секретные квантовые волоконно-оптические каналы с кодированием поляризацией фотонов (рис. 1). Как любая система связи она имеет свои уязвимости, связанные с физикой процессов распространения и измерения параметров фотонов. Обычно в модели угроз анализируются следующие уязвимости.

1. Угроза стойкости классической криптографии, которая строится на сложности выполнения математических операций с большими натуральными числами. Совершенствование техники вычислений операций сложения/вычитания бинарными компьютерами, операций умножения/деления квантовыми компьютерами и оптимального выбора нейрокомпьютерами приведёт к возможности дешифрования сообщения путём нахождения ключа из конечного множества натуральных чисел в реальном времени, что создаст угрозу современными методам шифрования на основе классической криптографии.

2. Угроза перехвата квантового ключа, надежность которого строится на физической невозможности скрытного декодирования квантового состояния носителя ключа. Любое манипулирование с квантовым носителем может быть выявлено протоколом распределения ключей. Но не существует абсолютно надёжных способов выявления скомпрометированных битов квантового ключа. Например, путём клонирования фотонов ключа нарушителем *E* и декодированием состояния с задержкой на время до момента подтверждения нескомпрометированности бита по протоколу пользователями *A* и *B*.

3. Угроза изменения информационной емкости секретного канала. Для передачи квантового ключа используется выделенное волокно с улучшенными свойствами для снижения вероятности взаимодействия с материалом, что дает возможность нарушителю *E* воздействовать физическими полями для повышения вероятности такого взаимодействия и снижению скорости передачи информации в квантовом канале.

4. Угроза доступа к конфиденциальной акустической информации через волоконно-оптические структурированные кабельные системы. Штатные волоконно-оптические каналы могут использоваться не только для передачи информации, но и сбора акустической информации или передачи внутренним нарушителем *C* или *D* информации из контролируемой зоны.

5. Угроза воздействия на аппаратуру квантового канала. Эксплуатация квантового канала требуют соблюдения определенных условий, особенно для чувствительных частей аппаратуры. Воздействие на неё внутреннего нарушителя *C* или *D* может изменить параметры работы установки.

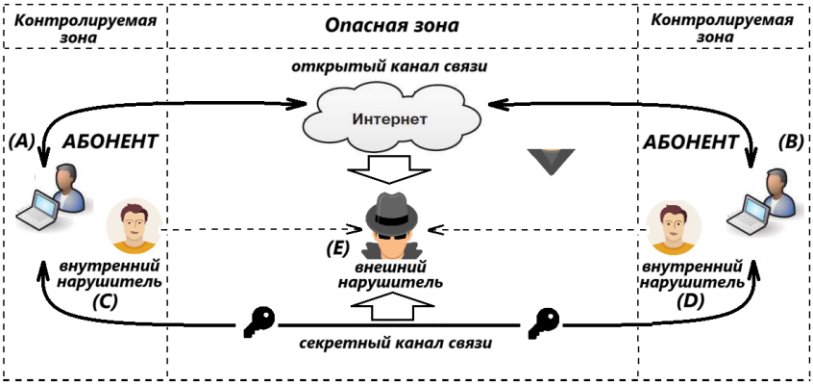


Рис. 1. Структура канала связи с квантовым шифрованием

УДК 535(06)+004(06)

Е.Е. КОВАЛЕВ[1,2], И.А. КАЗАКОВ[1,2], К.М. МАЛАХОВ[1,2],
А.В. ШИПУЛИН[1], А. ПАНАИ[1],
В.А. ЕМЕЛЬЯНОВ[1], И.А. РУМЯНЦЕВ[1]
[1]Сколковский институт науки и технологий
[2]ООО «Файбер Пайп» , Москва

ИНТЕРРОГАТОР НА ОСНОВЕ ДИФРАКЦИОННОЙ ВОЛНОВОДНОЙ РЕШЁТКИ ДЛЯ ОПРОСА ТОЧЕЧНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СОСТАВЕ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В работе представлен оптический интеррогатор для точечных датчиков, предназначенный для использования в аэрокосмических приложениях. Ключевым компонентом устройства является дифракционная волноводная решётка, выполняющая функцию миниспектрометра для спектрального демультиплексирования. Устройство построено на основе суперлюминисцентного диода, прошедшего термические испытания на устойчивость к экстремальным температурам. Дополнительно были проведены вибрационные и термические испытания оптических коннекторов.

E.E. KOVALEV[1,2], I.A. KAZAKOV[1,2], K.M. MALAKHOV[1,2],
A.V. SHIPULIN[1], A. PANAYI[1],
V.A. YEMELYANOV[1], I.A. RUMYANTSEV[1]
[1]Skolkovo Institute of Science and Technology
FIBER PIPE LLC, Moscow

INTERROGATOR BASED ON ARRAYED WAVEGUIDE GRATING FOR POLLING POINT OPTICAL SENSORS FOR USE IN AEROSPACE VEHICLES

The paper presents an optical interrogator for point sensors designed for use in aerospace applications. A key component of the interrogator is an arrayed waveguide grating (AWG), which performs the function of a minispectrometer for spectral demultiplexing. The device is based on a superluminescent diode (SLD), which has passed thermal tests for resistance to extreme temperatures. Additionally, vibration and thermal tests of optical connectors were carried out.

Высокая чувствительность и устойчивость к экстремальным условиям оптоволоконных датчиков делают их незаменимыми в аэрокосмических приложениях [1, 2]. Представленный в работе интеррогатор использует

дифракционную волноводную решётку в качестве миниспектрометра для спектрального демультиплексирования, что позволяет определять пиковые длины волн точечных датчиков с точностью до 60 пм [3]. Схема интеррогатора (рис. 1) включает суперлюминисцентный диод (СЛД), оптический циркулятор, волоконные брэгговские решётки (ВБР), дифракционную волноводную решётку (ДВР), фотодетекторы и обрабатывающий модуль. Для подтверждения работоспособности устройства в условиях космоса проведены вибрационные и термические испытания коннекторов (рис. 2). Оптоволоконный коннектор был подвергнут воздействию двух типов вибраций: регулярно изменяющимся по частотам (Periodic Chirp Signal) и случайным (Pseudo Random Signal). Также выполнялись тесты СЛД в диапазоне от -10 до +40 °C (рис. 3).

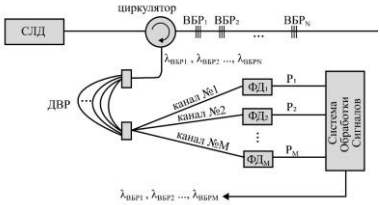


Рис. 1. Схема интеррогатора на ДВР



Рис. 2. Спектры СЛД во время проведения испытаний

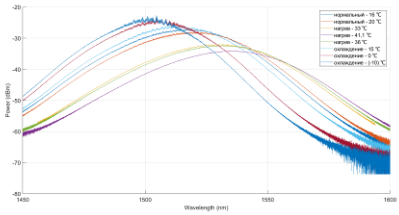


Рис. 3. Оптоволоконный коннектор FC/APC, закреплённый на шейкере вибростенда

Список литературы

1. Haddad E., et al. High temperature optical fiber sensor for atmospheric reentry // Proc. SPIE. 2017. V. 10562. P. 105620Z.

2. Deng Y., Jiang J. Optical fiber sensors in extreme temperature and radiation environments: A review // IEEE Sensors Journal. 2022. V. 22. No. 14. P. 13811-13834.

3. Казаков И.А., Малахов К.М., Ковалев Е.Е., Мкртчян А.А., Мишевский М.С., Светиков В.В., Шипулин А.В. Исследование алгоритма работы интеррогатора на основе дифракционной волноводной решетки на фотонной интегральной схеме // Фотоника. 2024. Т. 18. № 2. С. 35-42.

УДК 535(06)+004(06)

А.Л. ФИЛАТОВ
Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ ДЕТЕКТОРОВ МОЛНИЙ

Рассмотрены варианты реализации объективов и узкополосных оптических фильтров, которые ведущие космические агентства применяют в геостационарных детекторах молний. Проанализированы наиболее вероятные направления модернизации этих элементов в зависимости от перспективных задач, которые могут быть поставлены перед разработчиками.

A.L. FILATOV
Fryazino branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS

PROMISING DEVELOPMENT AREAS FOR GEOSTATIONARY LIGHTNING DETECTORS OPTICAL SYSTEMS

The paper considers the implementation options for lenses and narrow-band optical filters that leading space agencies have used for the geostationary lightning detectors. The most probable directions for these optical systems elements upgrading are analyzed depending on the promising tasks that may be set for the developers.

NASA с 2016 г. начала устанавливать геостационарные картографы молний Geostationary Lightning Mapper (GLM) на спутники наблюдения за окружающей средой Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES) [1]. Практически одновременно Китайское национальное космическое управление (CNSA) ввело в эксплуатацию аналогичную систему на спутниках FY-4 [2]. Европейское космическое агентств (ESA) в 2022 в рамках программы Meteosat Third Generation начало использовать подобный прибор на спутнике Meteosat 12 [3]. Роскосмос разрабатывает геостационарный детектор молний (ГДМ) [4].

Основными элементами оптической системы ГДМ являются объектив и узкополосный оптический фильтр, который предназначен для выделения на фоне отражённого от облаков солнечного света самого яркого триплета молнии с длиной волны 777,4 нм. Все космические агентства применяют узкополосные интерференционные фильтры с шириной полосы ≤ 2 нм, которая смещается при наклонном падении света. В работах [5, 6] было

предложено использовать акустооптические фильтры, у которых полоса пропускания практически не меняется при изменении угла падения света. На рис. 1 представлены установленные на спутниках оптические конструкции объективов. Видно, что в конструкциях (рис. 1*а* и 1*б*), применено совмещение нескольких объективов для увеличения зоны покрытия, уменьшенной в результате использования узкополосной фильтрации. Отсутствие совмещения объективов (рис. 1*в*) может быть связано с вероятной перспективой совместного применения на спутниках GOES с оптикой Membrane Optical Imager for Real-Time Exploitation [7] (рис. 1*г*) для использования в системах мониторинга двойного назначения.



а *б* *в* *г*

Рис. 1. Оптические конструкции объективов: Meteosat-12 (*а*); FY-4 (*б*); GOES (*в*); складной космический телескоп с мембранной оптикой (*г*)

В статье [8] была выдвинута гипотеза, о существовании корреляции между временными зависимостями интенсивности излучения одного и того же молниевого разряда, измеренного в оптическом и радио диапазонах. В работе [9] были предложены новые перспективные задачи для ГДМ, не входящие в перечень NASA, которые делают вероятным создание различных модификаций этого нового научного прибора.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

Список литературы

1. https://www.goes-r.gov/mission/mission.html.
2. https://fy4.nsmc.org.cn/nsmc/en/theme/FY4A_instrument.html#LMI.
3. https://eo.belspo.be/en/satellites-and-sensors/mtg-i1.
4. Квитка В.Е., Дюльдин Р.С., Клюшников М.В., Прасолов В.О. // Материалы 17-й конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». С. 140.
5. Филатов А.Л. // Солнечно-земная физика. 2022. Т. 8. № 3. С. 82.
6. Филатов А.Л. // Изв. РАН. Серия физическая. 2022. Т. 86. № 11. С. 1654.
7. https://newatlas.com/darpa-folding-telescope/30039/
8. Филатов А.Л., Луканина Л.А.// Изв. РАН. Серия физическая. 2023. Т. 87. № 10. С. 1503.
9. Филатов А.Л. // Изв. РАН. Серия физическая. 2024. Т. 88. № 11.

УДК 535(06)+004(06)

К.А. ПЯТИБРАТОВ
Сколковский институт науки и технологий

НАВИГАЦИЯ ПО ГРАВИТАЦИОННОМУ ПОТЕНЦИАЛУ С ПРИМЕНЕНИЕМ АТОМНЫХ ЧАСОВ

Приведена методика вычисления позиции объекта в неоднородном гравитационном поле. Выполнен сравнительный анализ способов интерполяции гравипотенциала по точечным измерениям с помощью атомных часов. Выполнена оценка пределов точности позиционирования объекта при использовании разнесённых в пространстве часов на атомах иттербия, перечислены способы повышения точности и стабильности измерений. Результирующая методика обеспечивает точность позиционирования от 500 до 1000 м в зависимости от размеров неоднородности; минимальная длина пути полной идентификации сокращена до 10 км; точность восстановления траектории 86 %.

K.A. PYATIBRATOV
Skolkovo Institute of Science and Technology

NAVIGATION BY GRAVITATIONAL POTENTIAL USING ATOMIC CLOCKS

A method for calculating the position of an object in a non-uniform gravitational field is presented. A comparative analysis of the methods for interpolating the gravitational potential from point measurements using atomic clocks is performed. An assessment of the limits of the accuracy of object positioning using spatially distributed clocks on ytterbium atoms is made, and methods for increasing the accuracy and stability of measurements are listed. The resulting method ensures a positioning accuracy of 500 to 1000 m depending on the size of the non-uniformity; the minimum length of the path of complete identification is reduced to 10 km; trajectory restoration accuracy is 86 %.

Современные фотонные интегральные схемы (ФИС) позволяют получить атомные часы со стабильностью частоты 10^{-18}, что обеспечивает возможность измерения релятивистского замедления времени в гравитационном поле [1]. С помощью пары разнесённых в пространстве атомных часов Yt можно измерить распределение ускорения свободного падения, и в дальнейшем построить полную карту скалярного поля гравитационного потенциала для фиксированных высот над земной поверхностью [2, 3]. Используя такую карту, можно получить автономный навигатор с высокой помехозащищённостью.

Целью работы является решение задачи о расположении движущейся материальной точки в скалярном поле гравипотенциала (рис. 1). Предполагается, что поле известно точно, и материальная точка так же точно измеряет текущее значение этого поля каждый фиксированный отрезок пути (рис. 2). Для карты малой размерности задача решается с высокой точностью простым перебором, однако для более близких к реальности систем объём вычислений критически нарастает.

Одним из наиболее эффективных методов ускорения и повышения эффективности расчётов является применение свёрточных нейронных сетей. В такой постановке задачи исходное скалярное поле является аналогом изображения, а массив значений, полученных материальной точкой – образом, который на изображении требуется найти.

Критерием эффективности решения является косинусная схожесть (либо среднеквадратичное отклонение) исходной и восстановленной траекторий. В работе сравниваются известные подходы [4, 5], реализованные в системах навигации подводных лодок. Целевым значением параметра точности восстановленной траектории является 95 % в относительных единицах; также сравниваются объём и необходимые вычислительные ресурсы для выполнения вычислений.

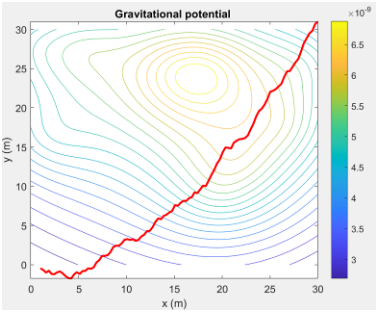


Рис. 1. Гравитационное поле и траектория материальной точки

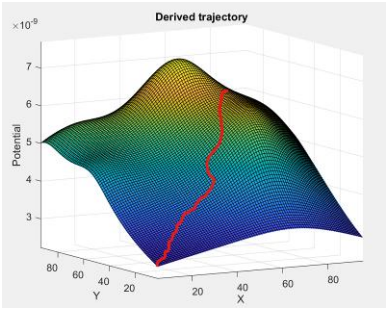


Рис. 2. Работа системы навигации по гравипотенциалу

Список литературы

1. Павлов Ю.Н., Селезнев А.В., Толстоусов Г.Н. Геоинформационные системы. М. : Машиностроение, 1978.

2. Pelka E.J., Debra D.B. The effects of relative instrument orientation upon gravity gradiometer system performance // J. Guidance and Control. 1979. V. 2. P. 18-24.

3. Гравиметрия и геодезия. М.: Научный мир, 2010.

4. Moryl J., Rice H., Shinners S. The universal gravity module for enhanced submarine navigation // IEEE Position Location and Navigation Symposium. USA, 1998, P. 324-331,

5. Vajda S., Zorn A. Survey of existing and emerging technologies for strategic submarine navigation // IEEE Position Location and Navigation Symposium. USA, 1998, P. 309-315.

УДК 535(06)+004(06)

Г.Н. ПАНИН, О.О. КАПИТАНОВА[1,2]
Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН, Черноголовка
[1]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
[2]Московский физико-технически институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ МЕМРИСТОРНЫЙ СЕНСОР НА ОСНОВЕ НИЗКОРАЗМЕРНЫХ КРИСТАЛЛОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Рассмотрен новый подход к обработке оптической информации с помощью оптоэлектронного мемристорного сенсора, изготовленного на основе двумерных материалов, таких как графен, оксид графена, диаман, оксисульфид молибдена, а также квантовых точек. Интеллектуальные оптоэлектронные мемристорные сенсоры со встроенной нейронной сетью позволяют энергоэффективно и быстро обрабатывать оптическую информацию в широком диапазоне от ультрафиолетового до инфракрасного излучения.

G.N. PANIN, O.O. KAPITANOVA[1,2]
Institute of Microelectronics Technology and High-Purity Materials of the RAS, Chernogolovka
[1]Lomonosov Moscow State University
[2]Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

OPTOELECTRONIC MEMRISTOR SENSOR BASED ON LOW-DIMENSIONAL CRYSTALS FOR OPTICAL INFORMATION PROCESSING

A new approach to optical information processing using an optoelectronic memristor sensor made from two-dimensional materials such as graphene, graphene oxide, diamane, molybdenum oxysulfide, and quantum dots is considered. Intelligent optoelectronic memristor sensors with an embedded neural network allow energy-efficient and fast processing of optical information in a wide range from ultraviolet to infrared radiation.

Оптоэлектронный мемристорный сенсор, состоящий из фотомемристоров [1 - 5], позволяет создать компактную, автономную и энергоэффективную систему обработки оптической информации в реальном времени [2]. Появление новых низкоразмерных кристаллов открывает уникальные возможности быстрой обработки электрических

[6, 7] и оптических [3 - 5] сигналов в широком спектральном диапазоне от ультрафиолетового до инфракрасного и терагерцового излучения. Энергонезависимые резистивные состояния в мемристорных структурах, изготовленных на основе двумерных кристаллов и квазиодномерных квантовых точек [8, 9], могут контролироваться светом и электрической поляризацией [1], фотоиндуцированными структурными переходами [3], ферроэлектрическими и ферромагнитными состояниями [10, 11], а также перестройкой атомов углерода в sp^2 - sp^3 гибридизации в электрическом поле [6, 7]. Такие устройства имеют высокую фоточувствительность [12] и демонстрируют динамическое поведение [4], необходимое для обработки оптической информации непосредственно в сенсоре [5]. Это уменьшает энергетические и временные затраты, связанные с переносом данных между детектором, памятью и процессором в архитектуре фон Неймана.

В работе рассмотрено новое оптоэлектронное устройство для обработки оптической информации – оптоэлектронный мемристорный детектор, изготовленный из низкоразмерных материалов, таких как графен, оксид графена, диаман, оксисульфид молибдена и квантовых точек, который позволяет энергоэффективно и быстро обрабатывать оптическую информацию. Фотомемристорные сенсоры из низкоразмерных кристаллов позволяют детектировать и обрабатывать информацию в широком оптическом диапазоне от ультрафиолетового до инфракрасного излучения. Интеллектуальные фотодетекторы со встроенной оптоэлектронной нейронной сетью, позволяют создать энергоэффективные нейроморфные системы широкополосной обработки оптической информации в реальном времени.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-49-00159 и поддержке работы оборудования ИПТМ РАН в рамках государственного задания № 075-00296-24-00.

Список литературы

1. Wang W., Panin G., Fu X., et al. // Sci. Rep. 2016. V. 6. P. 31224.
2. Panin G.N. // Electronics. 2022. V. 11. No. 4. P. 619.
3. Fu X., et al. // Small. 2019. V. 15. P. 1903809.
4. Panin G.N. // Chaos, Solitons & Fractals. 2021. V. 142. P. 110523.
5. Fu X., Li, T., Cai B., et al. // Light Sci Appl. 2023. V. 12. P. 39.
6. Panin G.N., Kapitanova O.O., et al. // Jpn. J. Appl. Phys. 2011. V. 50. P. 070110.
7. Kapitanova O.O., et al. // J. of Materials Science & Technology. 2020. V. 38. P. 237-243.
8. Fu X., et al. // Nanoscale. 2017. V. 9. No. 5. P. 1820-1826.
9. Kovaleva N.N., et al. //2D Materials. 2019. V. 6. P. 045021.
10. Panin G.N., et al. // AIP Conf. Proc. 2007. V. 893. P. 743-744.
11. Panin G.N., et al. // MRS Proceedings. 2006. V. 957. P. 406.
12. Fu X., et al. // Materials Horizons. 2022. V. 9. P. 3095-3101.

УДК 535(06)+004(06)

Я.В. ПРЖИЯЛКОВСКИЙ, Н.И. СТАРОСТИН, С.К. МОРШНЕВ, А.И. САЗОНОВ
Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

ЛИНЕАРИЗАЦИЯ ВЫХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ТОКА

Применение дифференциального способа для измерения сверхбольших токов вплоть до нескольких десятков мегаампер фарадеевским волоконно-оптическим датчиком приводит к нелинейности выходной характеристики датчика. Данный эффект обусловлен связью поляризационных мод, возникающей в точке соединения spun волокон с разными магнитооптическими чувствительностями из-за скачкообразного изменения их параметров. В настоящей работе мы предлагаем ряд методов, позволяющих сделать выходную характеристику датчика линейной.

Ya.V. PRZHIYALKOVSKIY, N.I. STAROSTIN, S.K. MORSHNEV, A.I. SAZONOV
Fryazino branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS

LINEARIZATION OF THE OUTPUT CHARACTERISTIC OF A DIFFERENTIAL FIBER-OPTIC CURRENT SENSOR

The implementation of a differential method for measuring ultra-high currents up to tens of megaamps using a Faraday fiber-optic sensor causes the sensor's output to be nonlinear. This effect is due to the coupling of polarization modes that occurs at the splice of spun fibers with different magneto-optical sensitivities, where the fiber parameters change. In this study, we suggest ways to make the sensor output linear.

Интерферометрический способ измерения электрического тока с помощью волоконно-оптического датчика предоставляет широкие возможности для точного и удобного контроля электроэнергии в энергетической промышленности [1, 2]. Работа такого устройства основана на регистрации фазового сдвига между двумя ортогональными эллиптично поляризованными волнами света в оптическом волокне со спиральной структурой осей встроенного линейного двулучепреломления (spun волокно) [3], возникающего вследствие магнитооптического эффекта Фарадея. Диапазон измеряемых токов в таком датчике ограничен максимальным значением фазового сдвига $\pi/2$, что устанавливает

верхнюю границу измеряемых токов величиной порядка 500 кА. Однако в таких приложениях, как измерение тока плазмы в термоядерных реакторах, ток может существенно превышать этот предел и достигать значения в несколько мегаампер [4].

Для измерения столь больших токов в [5] был предложен дифференциальный способ измерения. Для этого чувствительный элемент датчика изготавливается из двух последовательно соединённых spun волокон, отличающихся своей магнитооптической чувствительностью, при этом каждое из волокон охватывает проводник с током в противоположном направлении по отношению друг к другу. Однако скачкообразное изменение параметров spun волокон в месте их сварки приводит к связи поляризационных мод. Возникающие при этом вторичные волны также вносят свой вклад в выходной сигнал датчика, в результате чего его выходная характеристика становится нелинейной [6]. В настоящей работе мы подробно исследуем данный эффект и предлагаем ряд методов, позволяющих обеспечить линейную выходную характеристику. В частности, анализируется новый итерационный метод вычисления тока, предложенный нами ранее в [6], а также исследована возможность применения специального переходного волокна для минимизации связи мод при соединении двух spun волокон с разными параметрами.

Работа выполнена в рамках Госзадания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Список литературы

1. Bohnert K., et al. // Optics and Lasers in Engineering. 2005. V. 43 (3-5). P. 511-526.

2. Губин В.П. и др. // Фотоника. 2018. Т. 12. № 7. С. 704-715.

3. Przhiyalkovskiy Y.V., et al. //Journal of Lightwave Technology. 2020. V. 38 (24). P. 6879-6885.

4. Gusarov A., et al. // Fusion Engineering and Design. 2018. V. 136. P. 477-480.

5. Моршнев С.К., Пржиялковский Я.В., Старостин Н.И., Янин М.А. Патент РФ RU2792207C1 (PCT WO2023158334A1). Заявлен 15.02.2022, опубликован 20.03.2023.

6. Przhiyalkovskiy Y.V.? et al. // Journal of Lightwave Technology. 2024. V. 42 (9). P. 3423-3429.

УДК 535(06)+004(06)

В.К. ЕГОРОВ[1], Е.В. ЕГОРОВ[1,2], М.С. АФАНАСЬЕВ[2]
[1]Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН, Черноголовка
[2]Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПОТОКОВ В СВЕТОВОДАХ

Обсуждаются особенности явления полного внутреннего отражения потоков квазимонохроматического оптического излучения и условия реализации его распространения в световолах в соответствие с механизмом многократного полного внутреннего отражения. Показано, что в реальных световодах этот механизм не реализуем, а оптические потоки в них транспортируются в соответствие с механизмом волноводно-резонансного распространения.

V.K. EGOROV[1], E.V. EGOROV[1,2], M.S. AFANASIEV[2]
[1]Institute of Microelectronics Technology and High-Purity Materials of the RAS, Chernogolovka
[2]Fryazino branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS

OPTICAL FLUXES PROPAGATION PECULIARITIES IN OPTICAL FIBERS

Total internal phenomenon peculiarities of quasimonochromatic optical radiation are discussed. There are defined conditions the mechanism realization of multiple internal total reflections for optical fluxes transportation by fibers. It is shown that optical fluxes are transported by fibers in line with the waveguide-resonance propagation mechanism and in real conditions the multiple internal total reflection mechanism for fiber function is impressible.

Явление полного внутреннего отражения (ПВО) потоков оптического излучения характерно для отражения на интерфейсе между двумя оптически прозрачными средами с разными коэффициентами преломления, когда этот поток до отражения распространяется в среде с более высоким коэффициентом [1]. Само явление отражения света независимо от того, является оно полным внутренним или зеркальным, характеризуется появлением области интерференции вследствие взаимодействия падающего и отражённого потоков (рис. 1а), как это было впервые экспериментально показано Виенером [2]. Размер этой области, с одной стороны, определяется фазовым фактором, а с другой, является

следствием пространственной когерентности излучения [3]. В этой работе было показано, что продольный и поперечный размеры этой области определяются половиной длины когерентности излучения отражаемого потока. Фиксированность размера этой области позволила предположить, что в зависимости от соотношения между шириной плоского протяжённого щелевого зазора и размером интерференционной области возможно различие в механизмах распространения света (рис. 1б, в). Для широких зазоров будет реализовываться механизм многократного ПВО. В узких зазорах интерференционные области перекрываются с образованием однородного интерференционного поля, характерного для механизма волноводно-резонансного распространения оптического излучения [4]. Поскольку диаметр световодных каналов оптических волокон составляет десятки или сотни микрометров, а длина когерентности лазерного излучения, являющегося инструментом транспорта информации этими устройствами характеризуется значениями в сотни метров, можно утверждать, что световоды функционируют в рамках механизма волноводно-резонансного распространения излучения.

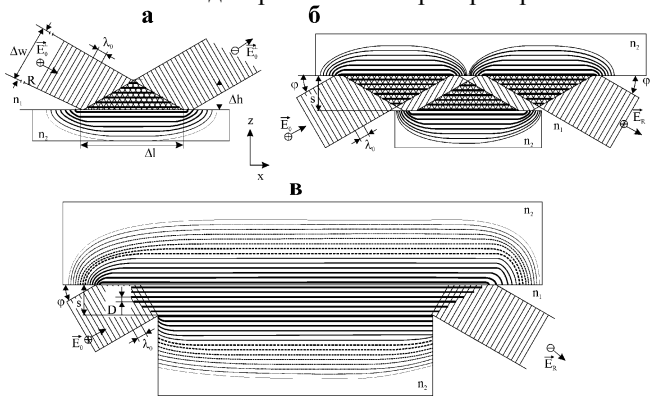


Рис. 1. Схема образования локального интерференционного поля при ПВО (а), схема транспортировки излучения механизмом многократного ПВО $s > \lambda_0^2/(2\Delta\lambda)$ (б), схема образования однородного интерференционного поля в условиях реализации волноводно-резонансного распространения $s < \lambda_0^2/(2\Delta\lambda)$ (в). $n_1 > n_2$, период стоячей волны $D = \lambda_0/(2n_1\cos\varphi)$

Список литературы

1. Harrick N.J. Internal reflection spectroscopy. New York: Wiley, 1967.
2. Wiener O. // Wied. Ann. 1890. V. 40. P. 203-243.
3. Mondel L., Wolf E. Optical coherence and quantum optics. Cambridge Univ. Press, 1995.
4. Egorov E.V., Egorov V.K. // J. Phys. Conf. Ser. 2021. V. 2144. P. 012013.

УДК 535(06)+004(06)

З.А. ЕРОВЕНКО, М.Е. МЕЗЕНЦЕВ, А.А. МАРКВАРТ, Н.А. УШАКОВ
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

СПЕКТРАЛЬНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ КОГЕРЕНТНАЯ ТОМОГРАФИЯ С МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАННЫМИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ ЗОНДАМИ

Системы оптической когерентной эластографии широко используются в медицинской диагностике для трёхмерного картирования упругих свойств тканей. В работе предложен метод мультиплексирования нескольких измерительных зондов за счёт введения вспомогательной амплитудной модуляции. Показано, как данный метод позволяет улучшить точность измерения эластических свойств объектов. Продемонстрировано, что предложенный метод не приводит к ухудшению пространственной разрешающей способности, максимальной глубины изображения и быстродействия системы. Проведена экспериментальная демонстрация возможностей метода на примере фантомов биологических тканей.

Z.A. EROVENKO, M.E. MEZENTSEV, A.A. MARKVART, N.A. USHAKOV
Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

SPECTRAL-DOMAIN OPTICAL COHERENCE TOMOGRAPHY WITH MULTIPLEXED SENSING PROBES

Optical coherent elastography systems are widely used in medical diagnostics for three-dimensional mapping of elastic properties of tissues. We propose a method for multiplexing several sensing probes by introducing auxiliary amplitude modulation. It is shown how this method improves the accuracy of measuring the elastic properties of objects. It is demonstrated that the proposed method does not lead to a deterioration in spatial resolution, maximum image depth nor system performance. An experimental demonstration of the method's capabilities was carried out using the example of biological tissue phantoms.

Оптическая когерентная томография (ОКТ) [1] позволяет неинвазивно получать трёхмерные изображения прозрачных и полупрозрачных объектов за счёт анализа зависимости интерференции света от длины волны. ОКТ широко применяется в биомедицинской диагностике и ряде других применений [2, 3]. На практике нередки задачи, в которых требуется одновременное получение интерференционных сигналов ОКТ в

нескольких различных точках. В частности, такая организация измерительной установки позволит повысить точность систем оптической когерентной эластографии (ОКЭ). Существующие методы мультиплексирования ОКТ зондов приводят к ухудшению измерительных характеристик системы, таких как продольная пространственная разрешающая способность, глубина изображения или максимальная скорость регистрации сигналов. В работе предложен альтернативный подход, использующий вспомогательную модуляцию для идентификации интерференционных компонент, соответствующих различным измерительным зондам.

В традиционных ОКТ-системах измерение продольного распределения коэффициента отражения или рассеяния происходит при помощи измерения зависимости интенсивности интерференционного сигнала от частоты света и применения преобразования Фурье к этой зависимости. При этом интерференция двух волн даёт в спектральном интерференционном сигнале компоненту с определенной частотой осцилляций, однозначно связанной с разностью оптических путей интерферирующих волн. В предлагаемом подходе излучение источника света делится между отдельными измерительными зондами, в подводящем плече каждого зонда устанавливается амплитудный модулятор, управляющая частота каждого модулятора устанавливается независимой, за счёт чего оказывается возможным идентифицировать интерференционные компоненты, образованные интерференцией волн, наблюдаемых различными зондами. Таким образом, наблюдая последовательность интерференционных сигналов и применяя к ним двумерное преобразование Фурье, можно получить информацию как о глубине рассеяния и отражения света, так и принадлежность того или иного отражения к конкретному зонду.

В контексте реализации ОКЭ, использование мультиплексированных зондов позволяет напрямую измерять фазовую задержку акустической волны, распространяющейся в образце посредством измерения аргументов двумерного преобразования Фурье. В работе демонстрируется измерение эластических свойств фантомов биологических тканей.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-72-10095, https://rscf.ru/project/23-72-10095/.

Список литературы

1. Huang D., Swanson E.A., et. al. // Science. 1991. V. 254 (5035). P. 1178.
2. Podoleanu A.G. // Journal of Lightwave Technology. 2010. V. 28, P. 624-640.
3. Zaitsev V.Y. // Physics-Uspekhi. 2023. V. 66. No. 8. P. 794-817.

УДК 535(06)+004(06)

Д.Д. КУЛИК, Л.Б. ЛИОКУМОВИЧ, Н.А. УШАКОВ
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ СПЕКТРАЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ

В работе разработана численно-аналитическая модель, описывающая формирование интерференционных сигналов в системах спектральной оптической когерентной томографии (ОКТ). Модель основана на расчёте суперпозиции волн, формируемых набором дискретных рассеивателей и позволяет учитывать тепловое, механическое и другие типы воздействий, оказываемых на исследуемый образец за счёт модуляции параметров рассеивателей. В модели предусмотрена возможность использования зондирующего излучения с негауссовым пространственным распределением. Данные возможности используются в работе для анализа возможности подавления спекл-эффекта на ОКТ изображения, а также улучшения пространственной разрешающей способности измерений.

D.D. KULIK, L.B. LIOKUMOVICH, N.A. USHAKOV
Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

SIGNAL MODELING FOR SPECTRAL-DOMAIN OPTICAL COHERENCE TOMOGRAPHY

The work presents a hybrid numeric-analytical model, describing formation of interference signals in spectral-domain optical coherence tomography systems (OCT). The backbone of the model is calculation of a superposition of partial waves, reflected off a set of discrete scatterers. The model allows to take into account thermal, mechanical and any other perturbation of the imaged sample by means of modulation of scatterers' parameters. It is also possible to consider the probe light having non-gaussian spatial distribution. These possibilities are used in the presented work to analyze the ways to suppress speckle effect in OCT images as well as improve the measurement spatial resolution.

Оптическая когерентная томография (ОКТ) [1] позволяет неинвазивно получать трёхмерные изображения прозрачных и полупрозрачных объектов за счёт анализа зависимости интерференции света от длины волны. ОКТ широко применяется в биомедицинской диагностике и ряде других применений [2, 3]. В связи с возрастающим количеством потенциальных применений ОКТ, требующих определенных характеристик от систем регистрации и обработки сигналов, увеличивается сложность разработки систем, а также время, необходимое

для тестирования и валидации корректности результатов измерений. При этом часто очень важно проводить тестирование системы на предварительных этапах в режиме аналитического и/или численного моделирования. В связи с этим актуальной задачей является разработка моделей, описывающих формирование сигналов в ОКТ системах.

В работе представлена модель формирования излучения в слаборассеивающих средах на основе дискретных рассеивающих центров. Модель учитывает согласованность пространственного распределения и распределение волнового вектора зондирующего излучения с ориентацией и диаграммой направленности рассеивателей. Также в модели учитывается изменение положение рассеивателей и локальное изменение показателя преломления исследуемого объекта при изменении температуры и воздействии механических возмущений. На основе сравнения результатов моделирования и анализа экспериментальных данных определены значения таких параметров модели, как плотность рассеивателей, их ориентация и диаграмма направленности, а также их вариация для различных типов тканей, при которых обеспечивается наилучшая корректность модели при разумных вычислительных затратах.

Разработанная модель была использована для моделирования интерференционных сигналов ОКТ, получаемых при нестандартных пространственных распределениях зондирующего излучения: при использовании негауссовых пучков, при организации интерференции излучения, доставляемого к исследуемому образцу разными зондами, продемонстрированы возможности по подавлению спекл-эффекта, а также улучшению поперечной пространственной разрешающей способности. Выводы, полученные на основе обработки сигналов, полученных при помощи разработанной модели, будут использованы при разработке системы оптической когерентной томографии с улучшенными характеристиками.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-72-10095, https://rscf.ru/project/23-72-10095/.

Список литературы

1. Huang D., Swanson E.A., et. al. // Science. 1991. V. 254 (5035). P. 1178.
2. Podoleanu A.G. // Journal of Lightwave Technology. 2010. V. 28, P. 624-640.
3. Zaitsev V.Y. // Physics-Uspekhi. 2023. V. 66. No. 8. P. 794-817.

УДК 535(06)+004(06)

В.В. ШИПКО, О.С. ТРОШИН
Военно-воздушная академия им проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, Воронеж

ОБОБЩЁННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ АКУСТООПТИЧЕСКОЙ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ АППАРАТУРОЙ В УСЛОВИЯХ ПОМЕХ И ИСКАЖЕНИЙ

Предложена обобщённая модель представления многокомпонентных изображений, формируемых кадровой гиперспектральной аппаратурой на основе акустооптических фильтров в условиях различного рода помех и искажений. В модели учитываются составляющие аддитивного и импульсного шума, а также аппликативных помех и геометрических искажений.

V.V. SHIPKO, O.S. TROSHIN
Air Forces Academy named after Prof. N.E. Zhukovskiy and Yu.A. Gagarin, Voronezh

GENERALIZED MATHEMATICAL MODEL FOR THE FORMATION OF SPECTRAL IMAGES BY ACOUSTO-OPTIC HYPERSPECTRAL EQUIPMENT UNDER CONDITIONS OF INTERFERENCE AND DISTORTION

A generalized model for the representation of multicomponent images generated by frame hyperspectral equipment based on acousto-optic filters under conditions of various kinds of interference and distortion is proposed. The model takes into account the components of additive and pulse noise, as well as applicative interference and geometric distortions.

Существующие кадровые гиперспектральные системы на основе акустооптических фильтров [1, 2] обладают техническими характеристиками, обеспечивающими их размещение на малогабаритных беспилотных летательных аппаратах (БпЛА) с возможностью получения спектральных изображений в достаточно широком диапазоне длин волн с высоким спектральным и пространственным разрешением, а также способностью обеспечивать быструю и произвольную спектральную перестройку. При формировании таких спектральных изображений с борта БпЛА каждый регистрируемый кадр спектрального изображения будет характеризоваться своей пространственной ориентацией, что приводит к их пространственному рассогласованию. Также при гиперспектральной съёмке детектируемое излучение разделяется на

десятки или сотни узкополосных составляющих, что приводит к существенному снижению уровня полезного сигнала по отношению к шуму, что проявляется в виде аддитивного и импульсного шума на формируемых спектральных изображениях.

Модель L-компонентного изображения, искажённого воздействием различного рода помех и искажений можно представить выражением:

$$\mathbf{X} = \left[X_{i,j}^{1} \quad X_{i,j}^{2} \quad \cdots \quad X_{i,j}^{L} \right] = \left[\mathbf{H}\left[\mathbf{\Lambda} + \boldsymbol{\eta} \right] + \left[\mathbf{E} - \mathbf{H} \right] \mathbf{W} \right] + \left[\mathbf{\Delta I}, \mathbf{\Delta J} \right], \quad (1)$$

где $i = 1,...,I$, $j = 1,...,J$; I, J – число строк и столбцов изображения; $\Lambda_{i,j}^{l} \in [0,...,2^{k} - 1]$ – значения яркости i, j-того элемента; l – индекс спектральной компоненты ГСИ, $l = 1,...,L$; k – разрядность квантования яркости; $\boldsymbol{\eta} = \left[\eta^{1} \quad \eta^{2} \quad \cdots \quad \eta^{L} \right]$ – случайное векторное поле спектрально- и пространственно-некоррелированного аддитивного шума с нулевым математическим ожиданием и некоторым значением среднеквадратического отклонения $\sigma_{\text{ш}}^{l}$; $\mathbf{H} = H_{i,j}^{l} \in \{0, 1\}$ – бинарное случайное векторное поле, определяющее расположение областей закрытия – отдельные импульсы или области некоторой формы и текстуры, аппликативно замещающие фрагменты поля $\mathbf{\Lambda}$; $\mathbf{E} = E_{i,j}^{l} = 1$ – векторное поле элементами которого являются единицы; $\mathbf{W} = W_{i,j}^{l}$ – случайное векторное поле, характеризующее яркости элементов $\mathbf{H} = 1$; $\mathbf{\Delta I}, \mathbf{\Delta J} = \Delta I_{i,j}^{l}, \Delta J_{i,j}^{l}$ – случайное векторное поле, характеризующее линейные смещения спектральных изображений по строкам и столбцам.

При этом каждая составляющая помех и искажений $\boldsymbol{\eta}$, $\mathbf{H}$, $\mathbf{W}$, $\mathbf{\Delta I}$, $\mathbf{\Delta J}$ может описываться различными параметрами распределения.

Представленная обобщённая комплексная модель искажений спектральных изображений получаемых акустооптическим гиперспектрометром может быть использована для численного моделирования искажающих факторов и дальнейшей оценки разрабатываемых методов и алгоритмов устранения таких помех и искажений.

Список литературы

1. Пожар В.Э., Мачихин А.С., Гапонов М.И., Широков С.В., Мазур М.М., Шерышев А.Е. Гиперспектрометр на основе перестраиваемых акустооптических фильтров для БПЛА // Светотехника. 2018. № 4. С. 47-50.

2. Шипко В.В. Пожар В.Э., Мачихин А.С., Баландин И.А., Борзов С.М., Лущик А.В., Киселев А.В. Разработка малогабаритной гиперспектальной системы с управляемым спектральным, пространственным и радиометрическим разрешением // Светотехника. 2022. № 4. С. 71-77.

УДК 535(06)+004(06)

В.М. КОТОВ, С.В. АВЕРИН, А.И. ВОРОНКО
Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

ВРАЩЕНИЕ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА, УПРАВЛЯЕМОЕ ЧАСТОТОЙ ЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ

Описан метод управляемого поворота плоскости поляризации линейно-поляризованного излучения, основанный на сложении двух взаимно ортогональных эллиптически поляризованных волн, параметры которых управляются звуковой волной в процессе акустооптического брэгговского взаимодействия. Теоретически показано, что угол поворота поляризации зависит от эллиптичности лучей и не зависит от длины волны света. Максимальный поворот поляризации определяется эллиптичностью складываемых волн и может достигать ~ 45 º.

V.M. KOTOV, S.V. AVERIN, A.V. VORONKO
Fryazino branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS

ROTATION OF THE PLANE OF THE LIGHT POLARIZATION, CONTROLLED BY THE ACOUSTIC WAVE FREQUENCY

A method of controlled rotation of the polarization plane of linearly polarized radiation is described, based on the addition of two mutually orthogonal elliptically polarized waves, the parameters of which are controlled by a sound wave in the process of acousto-optic (AO) Bragg interaction. Theoretically it is shown that the angle of rotation of polarization depends on the ellipticity of the beams and does not depend on the wavelength of light. The maximum polarization rotation is determined by the ellipticity of the folded waves and can reach ~ 45 °.

Предлагаемый метод основан на сложении двух взаимно ортогональных эллиптически поляризованных волн, амплитуды и фазы которых контролируются частотой звуковой волны в процессе акустооптического (АО) взаимодействия. В результате теоретического анализа найдены условия, когда при сложении двух эллиптически поляризованных волн формируется линейно поляризованная волна, угол наклона поляризации которой зависит от соотношения амплитуд складываемых волн. Показано, что угол наклона может меняться до ~ 45 º. На рис. 1 приведена векторная диаграмма, когда собственные эллиптически поляризованные волны кристалла с волновыми векторами K_1 и K_2 дифрагируют на акустической волне q в одну и ту же волну K_3,

претерпевая изотропную и анизотропную дифракции, соответственно [1, 2]. При мощностях звука, превышающих мощность перемодуляции, происходит обратный процесс – волна K_3 дифрагирует в K_1 и K_2. Изменение частоты звука приводит к изменению условий дифракции, и, как следствие, к перераспределению амплитуд волн K_1 и K_2.

Эксперименты выполнялись с АО-ячейкой, изготовленной на основе кристалла из TeO_2, дифракция осуществлялась на «медленной» звуковой волне, длина волны излучения – 0.63 мкм. На рис. 2 приведены расчётные и экспериментальные зависимости угла поворота ψ и эллиптичности ρ суммарного выходящего из кристалла излучения. Наблюдается хорошее согласие теоретических и экспериментальных результатов.

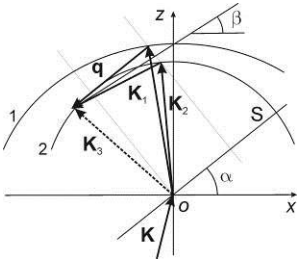


Рис. 1. Векторная диаграмма АО-дифракции в TeO_2

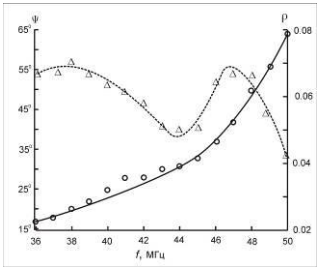


Рис. 2. Зависимость угла ψ поворота плоскости поляризации (сплошная кривая, левая шкала) и эллиптичности ρ (штриховая кривая, правая шкала) от частоты *f*

Работа выполнена в рамках Госзадания ФИРЭ РАН.

Список литературы

1. Волошинов В.Б., Чернятин А.Ю. // Оптика и спектр. 2000. Т. 88. № 6. С. 1000-1004.
2. Котов В.М. // Акустический журнал. 2016. Т. 62. № 5. С. 525-530.

УДК 535(06)+004(06)

С.С. НЕЖЕВЕНКО, К.В. ЕЖОВА, Д.Е. КУКУШКИН
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИНГУЛЯРНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ФАЗОВОГО ЗАПАЗДЫВАНИЯ ПОЛЯРИЗОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В работе представлено описание такой поляризационной аберрации, как фазовое запаздывание, а также алгоритм вычисление её численного значения с использованием матричных преобразований. Рассмотрена возможность замены полярного разложение матрицы поляризационных аберраций на сингулярное в виду упрощения вычислений.

S.S. NEZHEVENKO, K.V. EZHOVA, D.E. KUKUSHKIN
ITMO University, Saint-Petersburg

USING SINGULAR VALUE DECOMPOSITION TO CALCULATE THE RETARDANCE OF POLARIZED RADIATION

The paper presents a description of such a polarization aberration as a retardance, as well as an algorithm for calculating its numerical value using matrix transformations. The possibility of replacing the polar decomposition of the polarization aberration matrix with a singular one is considered in view of simplifying calculations.

Любой оптический элемент изменяет характеристики падающего на него поляризованного излучения. Часть такого воздействие, ответственная за фазовые изменения, называется фазовым запаздыванием. Оно выражается как изменение разности фаз между двумя ортогональными компонентами электрического поля волны [1]:

$$\delta = \left| \delta_p - \delta_s \right|,$$

Актуальность исследования связана с тем, что более чёткое понимание влияния фазового запаздывания на проходящее излучение позволяет точнее выбирать форму и материал оптических элементов [1].

Для расчёта значения этой поляризационной аберрации обычно используются формализмы Джонса или Мюллера. В обоих случаях алгоритмы вычисляют перемещения луча между оптическими поверхностями в глобальных координатах, а характер его изменения при

преломлении или отражении – в локальных. Из-за многократного перехода из одного базиса координат в другой к значению фазового запаздывания, связанного с физическими параметрами оптической системы, добавляется часть, связанная с геометрическим преобразованием координат.

Для того, чтобы исключить последнее необходимо определить матрицу поляризационных аберраций [2]:

$$K = O_{out} \cdot O_{in}^{-1} \cdot P_{total},$$

где ортогональная матрица O_{in} описывает переход вектора электрического поля из глобального базиса в локальный, матрица O_{out} – обратный переход, P_{total} – взаимодействие луча с поверхностью.

Полярное разложение раскладывает матрицу K на эрмитову и единичную, где последняя характеризует фазовое запаздывание. В связи с тем, что данная операция затруднительна с точки зрения вычислений, весьма эффективно использовать сингулярное разложение. Тогда матрица поляризационных аберраций будет выглядеть как [2]

$$K = K_\delta + K_D = UV^\dagger VSV^\dagger, \qquad (2)$$

где K_δ – единичная матрица, описывающая фазовое запаздывание, K_D – эрмитова матрица, U и V – единичные матрицы, D – диагональная матрица. Из этого следует, что

$$K_\delta = UV^\dagger.$$

Собственные значения λ_1 и λ_2 матрицы K_δ не равные единице, могут быть использованы для расчёта значения фазового запаздывания оптической системы без геометрической погрешности [2]:

$$\delta = \arg(\lambda_1) - \arg(\lambda_2).$$

Список литературы

1. Kukushkin D.E., Zhukova T.I., Bakholdin A.V., et al. // Applied Optics. 2022. V. 61. No. 17.

2. Chipman R.A., Lam W.S.T., Young G. Polarized Light and Optical Systems. CRC Press, 2019.

УДК 535(06)+004(06)

Д.А. ЧЕРНОУСОВ
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ФАНТОМНОЙ ПОЛЯРИМЕТРИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Обсуждается применение глубокого обучения при решении задачи вычислительной фантомной поляриметрии в классическом свете. Впервые получено пространственное распределение поляризационных свойств объектов, обладающих линейной амплитудной анизотропией с помощью многослойной нейронной сети. Показано преимущество исследуемого метода в сравнении с классическим методом вычислительной фантомной поляриметрии.

D.A. CHERNOUSOV
Lomonosov Moscow State University

SOLVING THE PROBLEM OF GHOST POLARIMETRY USING MACHINE LEARNING ALGORITHMS

The application of deep learning in solving the problem of computational ghost polarimetry in classical light is discussed. For the first time, a spatial distribution of the polarization properties of objects with linear amplitude anisotropy was obtained using a multilayer neural network. The advantage of the investigated method in comparison with the classical method of computational ghost polarimetry is shown.

В последние годы растёт число исследований, связанных с методами фантомной визуализации объектов. Метод фантомных изображений (ФИ) [1] позволяет построить изображение объекта без использования многопиксельного датчика. В отличие от традиционных способов получения изображений, для облучения объекта в вышеописанном методе используется свет с известным статистическим распределением по пространству. Развивая метод ФИ, приходим к методу фантомной поляриметрии (ФП) [2], позволяющей изучать поляризационные свойства объектов, имея датчик без пространственного разрешения, например, фотодиод.

Работая в формализме Джонса, мы можем описать объекты, обладающие линейно-амплитудной анизотропией (ЛАА) [3] с использованием матрицы Джонса, которая для объекта имеет вид:

$$\hat{\mathbf{M}}_{\mathbf{obj}} = \begin{pmatrix} \cos^2\theta + p\cdot\sin^2\theta & (1-p)\cdot\cos\theta\cdot\sin\theta \\ (1-p)\cdot cos\theta\cdot\sin\theta & p\cdot cos^2\theta + \sin^2\theta \end{pmatrix}$$

В работе используются три измерения, соответствующие трём углам поворота полуволновой пластинки. В качестве исследуемых параметров поляризации будет изучать величину и азимут анизотропии. Их связь с корреляционными функциями представлена ниже:

$$\begin{cases} G_{0^\circ}(\mathbf{r_m}) = (\cos^2\theta(\mathbf{r_m}) + p^2(\mathbf{r_m})\cdot\sin^2\theta(\mathbf{r_m}))\cdot D \\ G_{22.5^\circ}(\mathbf{r_m}) = (\frac{1}{2}\cdot(1 + p^2(\mathbf{r_m}) + (1-p^2(\mathbf{r_m}))\cdot\sin 2\theta(\mathbf{r_m})))\cdot D \\ G_{45^\circ}(\mathbf{r_m}) = (\sin^2\theta(\mathbf{r_m}) + p^2(\mathbf{r_m})\cdot\cos^2\theta(\mathbf{r_m}))\cdot D. \end{cases}$$

Здесь D – дисперсия интенсивности на пространственном модуляторе, p - величина анизотропии. Θ - азимут анизотропии. Данная система имеет аналитическое решение. Используя метод вычислительной фантомной поляриметрии и набор из 5000 тысяч шаблонов освещения, получаем ошибки 15.6 % и 20 % для θ и p соответственно.

В ходе проделанной работы разработана многослойная нейронная сеть. Входной вектор представляет из себя набор корреляционных функций. Для обучения и тестирования нейронной сети создан набор данных, представляющий из себя три набора вычисленных корреляционных функций и соответствующим им значения параметров θ и p. Критерием обучаемости модели выбрано среднеквадратическое отклонение. В результате нейронная сеть показала лучший результат, при десятой эпохе достигается минимальное отклонение θ и p, соответствующие 7.8 и 15.6 %.

Список литературы

1. Агапов Д.П., Беловолов И.В., Магницкий С.А. и др. // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2023. Т. 164. № 5. С. 722.

2. Janassek P., Blumenstein S, Els¨aßer W. //Optics Letters. 2018. V. 43. P. 833.

3. Savenkov S.N., Marienko V.V., Oberemok E.A., Sydoruk O. // Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics. 2006. V. 74. No. 5. P. 56607.

УДК 535(06)+004(06)

Н.Н. ДАВЛЕТШИН[1,2], А.М. ВЬЮНЫШЕВ[1,2]
[1]*Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск*
[2]*Сибирский федеральный университет, Красноярск*

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ФАНТОМНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ МИКРОСКОПИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Рассматривается возможность применения метода фантомной визуализации в оптической микроскопии. Продемонстрированы особенности применения метода в схеме оптического микроскопа. Проанализировано качество оптических и фантомных изображений микрообъекта.

N.N. DAVLETSHIN[1,2], A.M. VYUNISHEV[1,2]
[1]*Kirensky Institute of Physics of Krasnoyarsk Science Center of Siserian Branch of the RAS*
[2]*Siberian Federal University, Krasnoyarsk*

APPLICATION OF GHOST IMAGING FOR MICROSCOPIC OBJECT VISUALIZATION

The possibility of using ghost imaging in optical microscopy is considered. Features of the method in an optical microscope setup have been demonstrated. The quality of optical and ghost microscopy images has been analyzed.

Анализ морфологических характеристик биологических тканей является актуальной задачей биологии и медицины. Появление новых методов визуализации способствует развитию таких видов микроскопии, как конфокальная лазерная сканирующая микроскопия [1], микроскопия на основе структурного света [2], микроскопия сверхвысокого разрешения [3] и другие. В последнее время активно развивается новое направление в области визуализации объектов – фантомная визуализация. Суть метода заключается в получении пространственной информации объекта посредством анализа корреляций между двумя световыми полями, одно из которых проходит через объект (отражается от объекта) и регистрируется однопиксельным детектором, а второе световое поле, не взаимодействующее с объектом, регистрируется камерой [4].

Целью работы является экспериментальное исследование возможностей применения метода фантомной визуализации в оптической микроскопии.

Экспериментальная установка для реализации метода фантомной визуализации в схеме оптического микроскопа позволяет проводить

сравнительный анализ предложенного метода со стандартной оптической микроскопией. Построены аксиальные зависимости коэффициентов корреляции пространственного и интегрального сигналов от положения собирающего объектива. Была произведена оценка качества полученных изображений с использованием индекса структурного подобия (рис. 1). На основе индекса структурного подобия получены зависимости качества конечного изображения от положения собирающего объектива, что свидетельствует об увеличении глубины резкости оптической схемы в случае фантомной визуализации. Полученные результаты указывают на перспективность развития предложенного подхода – фантомной микроскопии.

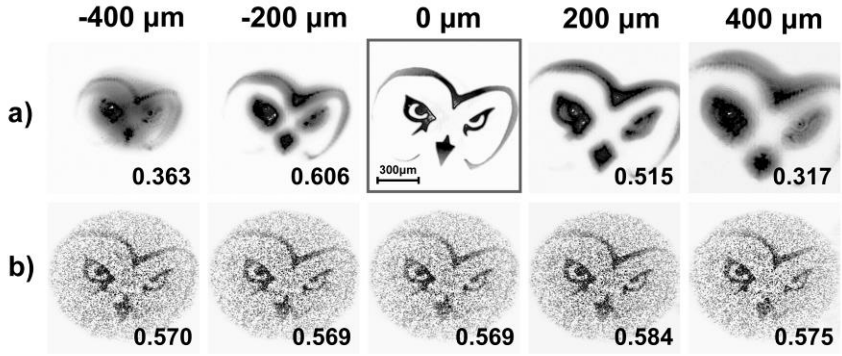


Рис. 1. Сравнение изображений, полученных методами оптической (a) и фантомной микроскопии (b) при различном относительном положении собирающего объектива, значения индекса структурного подобия приведены на соответствующих изображениях

Список литературы

1. Masters B.R. // SPIE Press. 2006. P. 230.
2. Gustafsson M.G.L.// Journal of Microscopy. 2000. V. 198. P. 82–87.
3. Hell S.W., Wichmann J. // Optics Letters. 1994. V. 19. P. 780-782.
4. Padgett M.J., Boyd R.W // Phil. Trans. 2017. V. 375. No. 2099. P. 20160233.

УДК 535(06)+004(06)

А.С. БРЕУСОВА
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ ФАНТОМНОЙ ПОЛЯРИМЕТРИИ К ИЗУЧЕНИЮ АНИЗОТРОПНЫХ ОБЪЕКТОВ

В работе исследуется применение методики фантомных изображений для решения задач поляриметрии. Предложенный подход, известный как фантомная поляриметрия, позволяет изучать пространственное распределение поляризационных характеристик объектов. Разработан вычислительный метод фантомной поляриметрии, а также впервые экспериментально подтверждена её эффективность при анализе объектов с фазовой анизотропией.

A.S. BREUSOVA
Lomonosov Moscow State University

APPLICATION OF GHOST POLARIMETRY METHOD TO THE STUDY OF ANISOTROPIC OBJECTS

This work explores ghost imaging techniques in application to polarimetry problems. The proposed approach, known as ghost polarimetry, makes it possible to study the spatial distribution of the polarization characteristics of objects. A computational method for ghost polarimetry has been developed, and its effectiveness in analyzing objects with phase anisotropy has been experimentally confirmed for the first time.

Фантомные изображения (ФИ) [1] представляют собой инновационную методику исследования оптических свойств объектов. В данной методике регистрируется среднее значение интенсивности, а восстановление изображения осуществляется через расчёт корреляционной функции.

В схеме экспериментальной установки для реализации метода фантомной поляриметрии (ФП) [2, 3] используется одно плечо, как в методике вычислительных ФИ [4]. Амплитудный объект представляет из себя четыре поляризатора с различными направлениями быстрой оси, соединённые вместе. Фазовый объект в первом приближении является неоднородной полуволной пластинкой, которая в некоторых областях поворачивает поляризацию на 45 °, а в других на 0 °. Для того, чтобы

провести измерения с фазовым объектом, после него необходимо поместить поляризатор.

Поляризационные свойства объекта описываются в формализме матриц Джонса, из них рассчитывается значение угла направление оси пропускания/направление быстрой оси θ, p - коэффициент прозрачности поляризатора.

Формула для угла поворота поляризатора относительно быстрой оси для амплитудного объекта(индексы i и j здесь и далее обозначают координаты пикселя изображения, в которых считаются значения):

$$\left|\theta^{ij}\right| = \frac{1}{2}\arccos\left(\frac{G_1^{ij} - G_2^{il}}{G_0^{ij}}\right).$$

Здесь G_2^{ij}, G_1^{ij} – значения корреляционных функций, когда полуволновая пластинка повернута на 45 или 0 градусов соответственно, G_0^{ij} – корреляционная функция в отсутствие объекта.

Формула для азимута анизотропии для фазового объекта

$$\theta^{ij} = \frac{1}{2}\arcsin\left(\sqrt{\frac{\frac{G_x^{ij}}{G_0^{ij}} - 1}{p^2 - 1}}\right).$$

Здесь G_x^{ij} – корреляционная функция в случае, когда полуволновая пластинка повернута на 0 градусов, G_0^{ij} – корреляционная функция когда полуволновая пластинка повернута на 0 градусов, но без объекта.

В данной работе впервые экспериментально получено пространственное распределение азимута анизотропии для объекта с линейной фазовой анизотропией, с использованием вычислительной фантомную поляриметрии в классическом свете.

Список литературы

1. Shapiro J.H., Boyd R.W. The physics of ghost imaging // Quantum Information Processing. 2012. V. 11.No. 4. P. 949-993.

2. Chirkin A.S., Gostev P.P., Agapov D.P., Magnitskiy S.A. Ghost polarimetry: ghost imaging of polarization-sensitive objects // Laser Physics Letters. 2018. V. 15. No. 11. P. 115404.

3. Restuccia S., Gibson G.M., Cronin L., Padgett M.J. Measuring optical activity with unpolarized light: Ghost polarimetry // Physical Review A. 2022. V. 106. No. 6. P. 062601.

4. Shapiro J.H. Computational ghost imaging // Physical Review A. 2008. V. 78. No. 6. P. 061802.

УДК 535(06)+004(06)

А.О. ИСМАГИЛОВ, Б.А. НАСЕДКИН, Е.Н. ОПАРИН,
А.К. ЛАППО-ДАНИЛЕВСКАЯ, В.С. ШУМИГАЙ, А.Н. ЦЫПКИН
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

РАЗВИТИЕ ПОДХОДОВ ОДНОПИКСЕЛЬНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Приведены результаты по циклам экспериментов и моделирования, демонстрирующих возможности развития подходов однопиксельной визуализации как для улучшения качества результатов восстановления, так и для расширения области применения данной технологии. Показана возможность увеличения скорости измерений за счёт мультиплексирования, подавления шума за счёт использования дополнительного канала, применения в видимом, инфракрасном и терагерцовом диапазонах.

A.O. ISMAGILOV, B.A. NASEDKIN, E.N. OPARIN,
A.K. LAPPO-DANILEVSKAYA, V.S. SHUMIGAY, A.N. TCYPKIN
ITMO University, Saint-Petersburg

DEVELOPMENT OF SINGLE-PIXEL IMAGING APPROACHES

The results of a series of experiments and simulations are presented, demonstrating the potential for the advancement of single-pixel imaging techniques. These include the enhancement of reconstruction outcomes and the expansion of the technology's operational scope. The feasibility of accelerating measurements through multiplexing and the mitigation of noise through an additional channel are also demonstrated. Additionally, the applicability of this technology to the visible, infrared, and terahertz ranges is illustrated.

Однопиксельная визуализация (ОВ), включающая в себя фантомную визуализацию и технологию однопиксельной камеры, находится на стадии активного развития, и привлекает большое внимание как исследователей так и представителей индустрии [1].

Восстановление пространственного распределения оптических свойств объектов за счёт корреляции между модулированным полем излучения и интенсивностями, зарегистрированными однопиксельным детектором позволяет работать в условиях наличия шума и засветки, а использование однопиксельного детектора позволяют увеличить чувствительность и уйти от многопиксельных матриц, что особенно

актуально при работе в ультрафиолетовом, дальнем инфракрасном и терагерцовом диапазонах излучения [2 - 4].

В цикле наших работ были проведены исследования по возможности развития однопиксельной визуализации с точки зрения модификации экспериментальной схемы измерений и поиску их симбиоза с практическими применениями.

В данной работе представлены результаты по моделирования формирования спекл-структур и их использованию в фантомной визуализации в терагерцовом диапазоне [5], мультиплексированию по длине волны шаблонов освещения с применением одного пространсвенного модулятора в видимом диапазоне (рис. 1) [6], мультиплексированию по состоянию поляризации в инфракрасной области, моделированию объединения технологий лидар и однопиксельной камеры, а также влияния рассеивающей среды (рис. 2) и подавления шума [7, 8].

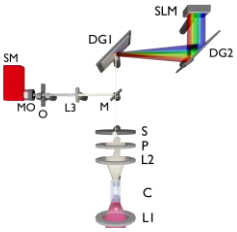


Рис. 1. Схема мультиплексной фантомной визуализации в видимом диапазоне [6]

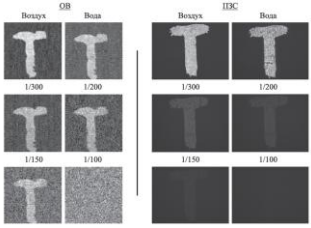


Рис. 2. Изображения, полученные с помощью однопиксельной визуализации и камеры при рассеянии [7]

В результате будут представлены направления развития однопиксельной визуализации в лаборатории квантовых процессов и измерений Университета ИТМО. Показаны преимущества и недостатки такого подхода и актуального применения в реальных системах.

Список литературы

1. Edgar M.P., Gibson G.M., Padgett M.J. // Nat. Photonics. 2019. V. 13 (1). P. 13-20.
2. Bromberg Y., Katz O., Silberberg Y. // Phys. Rev. A. 2009. V. 79 (5). P. 053840.
3. Lane T.J., Ratner D. // Opt. Express. 2020. V. 28 (5). P. 5898-5918.
4. Zanotto L., et al. // Opto-Electronic Advances. 2020. V. 3 (9). P. 09200012.
5. Ismagilov A., et al. // JOSA B. 2022. V. 39 (9). P. 2335-2340.
6. Shumigai V.S., et al. // Opt. Laser Technol. 2024. V. 169. P. 110135.
7. Oparin E.N., et al. // J. Sci. Tech. Inf. Technol. Mech. Opt. 2024. V. 156 (4). P. 548.
8. Oparin E.N., et al. // Appl. Opt. 2023. V. 62 (22). P. 5954-5958.

А.С. БОРЕЙШО[1,2], А.В. САВИН[1,2], С.Ю. СТРАХОВ[1],
Г.А. СУХАНОВ[1], Г.Т. ДЖГАМАДЗЕ[1,2], Н.В. СОТНИКОВА[1]
[1]Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург
[2]АО «Лазерные системы», Санкт-Петербург

ОПТОИНФОРМАЦИОННЫЙ МЕТОД СУБДИФРАКЦИОННЫХ УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Предлагается метод измерения углового положения лазерного пучка относительно нормали к плоской поверхности, обеспечивающий погрешность на уровне 1/10 − 1/100 дифракционного предела. Метод основан на применении специальных алгоритмов математической обработки массива двумерных интерференционных картин, создаваемых интерферометром Майкельсона с подвижным уголковым отражателем.

A.S. BOREYSHO[1,2], A.V. SAVIN[1,2], S.Yu. STRAKHOV[1],
G.A. SUKHANOV[1], G.T. DZHGAMADZE[1,2], N.V. SOTNIKOVA[1]
[1]Baltic State Technical University «Voenmeh» named after D.F. Ustinov, Saint-Petersburg
[2]Laser systems Ltd, Saint-Petersburg

OPTO-INFORMATION METHOD FOR SUB-DIFFRACTION ANGULAR MEASUREMENTS

A method proposed for measurement the angle between laser beam and flat surface normal with error of about 1/10...1/100 of diffraction limit. The method is based on digital processing of diffraction pictures array produced by Michelson interferometer with moved retro reflector.

Задача измерения и/или стабилизации углового положения лазерных пучков относительно базовых оптических поверхностей возникает во многих случаях, например, когда соответствующий пучок используется как носитель системы отсчёта для юстировки сложных распределённых оптических систем. Интерференционные и автоколлимационные методы в принципе позволяют проводить высокоточные угловые измерения [1, 2], но они обычно требуют большого продольного размера оптической системы.

Оптоинформационные подходы, применённые к обработке данных интерферометра Майкельсона с подвижным ретрорефлектором [3], дают возможность измерить угол отклонения лазерного луча от нормали к

отражающей плоской поверхности с погрешностью порядка 1/10 − 1/100 дифракционного предела, при этом оптическая схема имеет размеры порядка диаметра лазерного пучка и в принципе нечувствительна к вибрации.

На рис. 1 показана зависимость угла, полученного путём анализа синтезированных интерференционных картин, от действительного угла, задаваемого при синтезе картины. Здесь d − размер гауссова пятна (1/e2), Δ − шаг пикселов, D = NΔ − размер анализируемого квадратного изображения, Видно, что при достаточно высоком контрасте (0,5) в диапазоне углов от ~ 0,02 до ~ 1 дифракционного предела удаётся определить угол падения пучка даже при SNR = 3. На верхнем пределе измеряемого угла в любом окне, полностью или почти полностью занимаемом лазерным пятном, размер окна должен быть примерно равен половине ширины интерференционной полосы. При этом, разумеется, на размере окна должно укладываться хотя бы несколько пикселов, чтобы можно было вычислить наклон профиля интенсивности интерференционной картины.

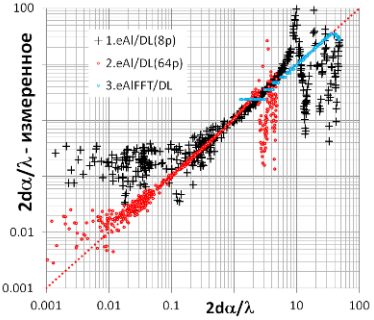


Рис. 1. SNR = 3; d = 75; d/D = 1.17; K = 0.5. *1* − 64 x 64, *2* – 8 x 8 пикс., *3* – FFT

Список литературы

1. Sommargren G.E. Angle measuring interferometer. US Patent US4746216. Applicants: Zygo Corporation. 24.05.1988. Priority 06845926 28.03.1986 US.

2. Shimizu Y., Chen L.-C., Kim D.W., Chen X., Li X., Matsukuma Hi. An insight into optical metrology in manufacturing // Meas. Sci. Technol. 2021. V. 32. P. 042003.

3. Борейшо А.С., Савин А.В., Страхов С.Ю., Ершов А.Г., Суханов Г.А., Джгамадзе Г.Т., Сотникова Н.В. Оптоинформационный метод субдифракционных угловых измерений // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 12. С. 13-23./

УДК 535(06)+004(06)

Н.В. НИКИТИН, А.В. КОЗЛОВ, В.Г. РОДИН, Р.С. СТАРИКОВ,
П.А. ЧЕРЁМХИН, Н.Н. ЕВТИХИЕВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ КОМПЕНСАЦИИ ШУМОВ ЦИФРОВЫХ КАМЕР ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ВРЕМЕНИ РЕГИСТРАЦИИ В ФУРЬЕ-ПТИХОГРАФИИ

В работе проведено исследование методов для восстановления изображения методом фурье-птихографии. Для уменьшения времени регистрации рассмотрено использование методов компенсации шумов цифровых камер.

N.V. NIKITIN, A.V. KOZLOV, V.G. RODIN, R.S. STARIKOV,
P.A. CHEREMKHIN, N.N. EVTIKHIEV
National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

DIGITAL CAMERA NOISE COMPENSATION IN FOURIER PTYCHOGRAPHY FOR REGISTRATION TIME REDUCTION

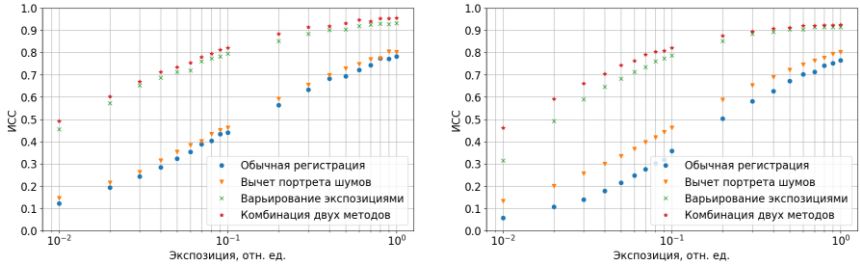
The work carried out a study of methods for image rescontruction using the Fourier ptychography method. Digital camera noise compensation methods are used to reduce registration time.

Фурье-птихография позволяет восстанавливать высокочастотные компоненты фурье-спектра объекта. Для этого регистрируются изображения объекта, освещённого под различными углами [1]. Такая регистрация дает некоторое число световых снимков, а также большое количество темновых снимков, характеризующихся низким отношением сигнал/шум, что может оказывать существенное негативное влияние на качество восстановленного изображения.

Один из вариантов снижения влияния низкого качества темновых кадров – учёт пространственного распределения темновых шумов на сенсоре камеры. Для определения пространственного портрета темновых шумов необходимо найти среднее значение сигнала в каждом пикселе для кадров, полученных при съёмке в отсутствии источников излучения [2]. После вычитания пространственного портрета появляются пиксели с отрицательными значениями сигнала: их значения приравниваются к нулю, что приводит к снижению информационного содержания кадров. В качестве альтернативы можно использовать метод варьирования

экспозициями. Этот метод выравнивает среднее значение световых и темновых снимков. В экспериментах это можно реализовать двумя способами: увеличением времени регистрации или использованием сферической светодиодной матрицы [3]. Перед реконструкцией сигналы изображений будут перенормироваться относительно своих средних значений.

В работе проведены численные эксперименты по применению методов компенсации шумов цифровых камер в фурье-птихографии. В моделировании добавлены шумы цифровых камер: Retiga R6 и Pixelink PL-B781F. В качестве объекта использовался амплитудно-фазовый двумерный объект размером 1024 × 1024 пикселя. На рис. 1 представлены графики зависимости качества восстановления по метрике индекс структурного сходства (ИСС) для обеих камер.



а *б*

Рис. 1. Оценка качества восстановленных изображений в фурье-птихографии при моделировании параметров камер Retiga R6 (*а*) и Pixelink PL-B781F (*б*)

Для Retiga R6 вычет портрета шумов дает меньшее улучшение в сравнении с Pixelink PL-B781F, это связано с тем, что темновой пространственный шум оказывает большее влияние на качество восстановления для камеры Pixelink PL-B781F. Использование метода варьирования экспозициями позволяет улучшить качество восстановления в 4 раза для Retiga R6 и в 5 раз для Pixelink PL-B781F при малых значениях экспозиций.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 24-19-00899.

Список литературы

1. Konda P.C., et al. // Optics Express. 2020. V. 28. No. 7. P. 9603-9630.
2. Козлов А.В. и др. // Измерительная техника. 2024. № 12. С. 26-34.
3. Zheng G., et al. //Nature Reviews Physics. 2021. V. 3. No. 3. P. 207-223.

УДК 535(06)+004(06)

В.Г. КУЗЬМИН[1], К. ЧУТРИ[2], Р. ФАРЕХ[3], Д.В. ДЫЛОВ[1,4]
[1]*Сколковский институт науки и технологий*
[2]*Институт аэронавтики и космических исследований, Блида, Алжир*
[3]*Университет Шарджи, ОАЭ*
[4]*Институт искусственного интеллекта AIRI, Москва*

РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ ЗА ПРЕДЕЛАМИ ОПТИЧЕСКОГО РАЗРЕШЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ФУРЬЕ-ПТИХОГРАФИИ И НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Приведены результаты экспериментов по формированию сверхразрешённых изображений в микроскопе на основе птихографии. Адаптирован ряд современных нейросетевых методов для детекции и распознавания образов на примере распределённых плохо разрешённых токенов в объёме образца. Изучено взаимное влияние параметров оптической установки и параметров нейросетевых моделей на качество изображений, скорость реконструкции и качество распознавания.

V.G. KUZMIN[1], K. CHOUTRI[2], R. FAREH[3], D.V. DYLOV[1,4]
[1]*Skolkovo Institute of Science and Technology*
[2]*Aeronautical and Spatial Studies Institute, Blida, Algeria*
[3]*University of Sharja, UAE*
[4]*Artificial Intelligence Research Institute, Moscow*

PATTERN RECOGNITION BEYOND OPTICAL RESOLUTION USING FOURIER PTYCHOGRAPHY AND NEURAL NETWORKS

We present the results of experiments on the formation of super-resolution images in a microscope based on ptychography. Several modern neural network methods have been adapted for the detection and the recognition of patterns in the problem of distributed poorly resolved tokens in the sample volume. The mutual influence of the parameters of the optical setup and the parameters of the neural network models on the quality of images, the speed of reconstruction and the quality of recognition was studied.

Все классические оптические системы демонстрируют компромисс между размером поля зрения и разрешением получаемого изображения, который можно сформулировать в виде конечной полосы пропускания оптической системы. Фурье-птихография позволяет увеличить полосу пропускания для конкретной системы, путём реконструкции изображения сверхвысокого разрешения из набора изображений снятых при разных углах падения освещаемого пучка. Однако в этом случае появляется

компромисс между скоростью получения набора изображений и пропускной способностью оптической системы [1, 2].

Для увеличения скорости получения изображения сверхвысокого разрешения свою эффективность показало использование различных схем мультиплексного освещения (рис. 1) за счёт снижения общего количества изображений в стеке и повышение быстродействия оборудования (за счёт снижения затрат времени на получение и обработку изображений) [3, 4].

Целью работы является исследование возможностей применения нейронных сетей для ускорения выполнения задач распознавания объектов, распределённых в объёме образца (рис. 2), за пределами разрешающей способности оптической системы микроскопа. Будут продемонстрированы первые результаты по распознаванию образов при существенном недоразрешении («размытии» объектов) и рассмотрены аналогии между оптическими и цифровыми методами сверхразрешения.

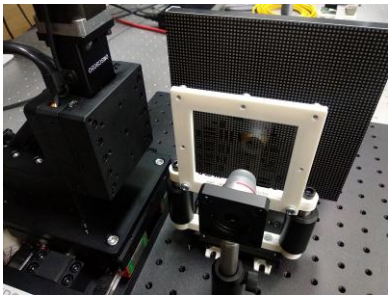


Рис. 1. Установка для оптической птихографии



Рис. 2. Распределение детектируемых токенов (буквы P и Q) в образце

Список литературы

1. Zheng G., Horstmeyer R., Yang C. // Nature photonics. 2013. V. 7 (9). P. 739-745.
2. Tian L., et al. // Biomedical optics express. 2014. V. 5 (7). P. 2376-2389.
3. Kellman M., et al. // 2019 IEEE ICCP. 2019. P. 1-8.
4. Tian L., et al. // Optica. 2015. V. 2 (10). P. 904-911.

УДК 535(06)+004(06)

Л.Л. ДОСКОЛОВИЧ[1,2], Д.В. СОШНИКОВ[1,2], Г.А. МОТЗ[1,2],
Е.А. БЕЗУС[1,2], Р.В. СКИДАНОВ[1,2]
[1]*Институт систем обработки изображений НИЦ «Курчатовский институт», Самара*
[2]*Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева*

ДИЗАЙН КАСКАДНЫХ ДОЭ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ И ФОРМИРОВАНИЯ ЗАДАННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Рассмотрена задача оптической классификации изображений с помощью каскадных дифракционных оптических элементов (ДОЭ). Задача сформулирована как задача минимизации функционала, зависящего от функций высот микрорельефа каскадного ДОЭ и представляющего ошибку решения рассматриваемой задачи классификации. Для производных функционала получены явные выражения. Рассмотрено обобщение метода на случай расчёта каскадных ДОЭ, предназначенных для решения нескольких различных задач классификации изображений на нескольких различных длинах волн, а также для формирования различных распределений интенсивности при различных длинах волн.

L.L. DOSKOLOVICH[1,2], D.V. SOSHNIKOV[1,2], G.A. MOTZ[1,2],
E.A. BEZUS[1,2], R.V. SKIDANOV[1,2]
[1]*Image Processing Systems Institute of National Research Centre «Kurchatov Institute», Samara*
[2]*Samara National Research University*

DESIGN OF CASCADED DOEs FOR OPTICAL IMAGE CLASSIFICATION AND BEAM SHAPING

We consider the problem of optical image classification using cascaded diffractive optical elements (DOEs). The problem is formulated as a problem of minimizing an error functional, which depends on the functions of the diffractive microrelief height of the cascaded DOE and represents the error of solving the considered classification problem. Explicit expressions are obtained for the derivatives of the functional. The method is generalized to the problem of calculating cascaded DOEs intended for solving several different image classification problems at several different wavelengths, as well as for generating different intensity distributions at different wavelengths.

В последние годы наблюдается большой интерес к разработке структур фотоники для оптических вычислений и оптической обработки информации. Указанные структуры рассматриваются в качестве

перспективной элементной базы, призванной обеспечить дальнейшее развитие вычислительных систем. В качестве одного из наиболее перспективных направлений в области оптической обработки информации рассматриваются дифракционные нейронные сети (ДНС), выполненные в виде каскада фазовых ДОЭ [1 - 3]. Одной из основных задач, в которой ДНС (каскадные ДОЭ) продемонстрировали высокую эффективность, является задача оптической классификации изображений. В настоящей работе рассмотрен градиентный метод расчёта каскадных ДОЭ для решения задач классификации. В рамках метода задача сформулирована как задача минимизации функционала, зависящего от функций высот дифракционного микрорельефа каскадного ДОЭ и представляющего ошибку решения заданной задачи классификации. С использованием свойства унитарности оператора распространения света для производных функционала ошибки получены явные и компактные выражения.

В большинстве работ каскадные ДОЭ (ДНС) рассчитываются для излучения одной заданной длины волны. В то же время большой интерес представляют каскадные ДОЭ, предназначенных для работы с излучением различных длин волн. Такие «спектральные» ДОЭ (спектральные ДНС) могут использоваться для обработки спектральной информации, осуществлять параллельное решение различных задач машинного обучения на различных длинах волн, изменять свою функциональность в зависимости от длины волны падающего излучения. В работе рассмотрен вариант градиентного метода для расчёта спектральных ДНС для решения нескольких различных задач классификации изображений на нескольких различных длинах волн, а также для формирования различных распределений интенсивности при различных длинах волн. С использованием метода рассчитаны спектральные ДНС для решения следующих трёх задач: задачи классификации рукописных цифр из базы данных MNIST на длине волны $\lambda_1 = 457$ нм, задачи классификации предметов одежды из базы данных Fashion MNIST при $\lambda_2 = 532$ нм и задачи классификации десяти рукописных букв из базы данных EMNIST при длине волны $\lambda_3 = 633$ нм. Представленные результаты расчёта спектральных ДНС демонстрируют их высокие рабочие характеристики. В частности, рассчитанный каскад из трёх ДОЭ обеспечивает точности решения трёх указанных задач классификации в 97.41, 89.1 и 92.95 %.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 24-19-00080.

Список литературы

1. Lin X., Rivenson Y., et al. // Science. 2018. V. 361 (6406). P. 1004.
2. Chen H., Feng J. et al. // Engineering. 2021. V. 7 (10). P. 1483.
3. Li J., Gan T., et al. // Advanced Photonics. 2023. V. 5(1). P. 016003.

УДК 535(06)+004(06)

Р.С. СТАРИКОВ. А.В. ШИФРИНА
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

МЕТОДЫ РЕАЛИЗАЦИИ ФУНКЦИИ НЕЛИНЕЙНОЙ АКТИВАЦИИ В ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЯХ

Приведён обзор существующих и теоретически обоснованных методов реализации функции нелинейной активации в оптических дифракционных нейронных сетях. Оценено влияние наличия функции активации на эффективность работы оптической нейронной сети, выявлены недостатки и преимущества предложенных методов, продемонстрированы наиболее перспективные передовые исследования.

R.S. STARIKOV, A.V. SHIFRINA
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

METHODS OF IMPLEMENTING THE NONLINEAR ACTIVATION FUNCTION IN DIFFRACTIVE OPTICAL NEURAL NETWORKS

An overview of existing and theoretically justified methods for implementing the nonlinear activation function in optical diffractive neural networks is given. The influence of the presence of the activation function on the efficiency of such neural network is assessed, the disadvantages and advantages of the proposed methods are identified, and the most promising current studies are demonstrated.

Оптические нейронные сети – перспективная область развития нейронных сетей (НС) [1], получившая новый толчок к развитию с созданием глубокой дифракционной НС, описанной в [2]. Однако одним из факторов, ограничивающих их эффективность, являются затруднения с включением в архитектуру НС функции нелинейной активации.

Хотя, даже в отсутствии функции активации, оптические дифракционные НС способны проявлять свойство глубины [3], реализация данной функции позволяет повысить эффективность работы системы (оцениваемой как точность классификации/распознавания).

В работе рассмотрены предложенные на данный момент методы реализации нелинейной активации. Они разделены на два класса.

Первый класс – это гибридные оптико-цифровые системы, в которых функция активации реализовывается полностью численно [4] либо связана с аналогово-цифровым преобразованием [5]. Данные системы

наиболее просты в аппаратном воплощении, но обладают значительными ограничениями по быстродействию, поскольку требуют многократных переводов обрабатываемой информации из аналогового в цифровое представление и обратно. Среди данных систем отдельно выделяют архитектуры, использующие в качестве источника нелинейности процесс регистрации светового распределения с помощью фотосенсора (то есть квадратичную связь интенсивности и амплитуды).

Второй класс – это полностью оптические системы [6] (рис. 1). Данные нейронные сети позволяют достичь наиболее высокого быстродействия, поскольку все преобразования происходят с световыми распределениями напрямую. Однако практическая реализация таких схем на данном уровне развития элементной базы затруднена. Ограничивающим фактором является существенная линейность оптических преобразований при низких уровнях энергии используемого излучения (порядка сотен мВт – единиц Вт; при данных значениях энергии влияние нелинейных эффектов пренебрежимо мало). Среди полностью оптических систем наиболее перспективны системы, основанные на использовании метаповерхностей [7] – композитных структур, позволяющих управлять и амплитудой, и фазой оптического излучения.

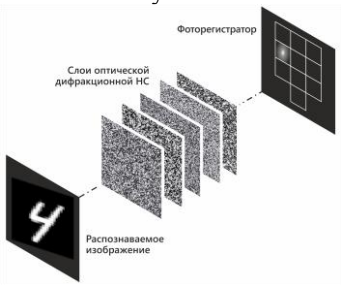


Рис. 1. Принципиальная схема оптической дифракционной нейронной сети

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 23-12-00336.

Список литературы

1. Fu T., Zhang J., et al. // Light Sci. Appl. 2024. V. 13 (1). P. 263.
2. Kulce O., Mengu D., et al // Light Sci. Appl. 2021. V. 10 (1).
3. Lin X., Rivenson Y., et al. // Science. 2018. V. 361 (6406). P. 1004-1008.
4. Mengu D., Luo Y., et al. // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2020. V. 26 (1). P. 1-14.
5. Qian C., Lin X., et al. // Light Sci. Appl. 2020. V. 9 (1). P. 59.
6. Sun Y., Dong M., et al. // Opt. Lett. 2022. V. 47 (1). P. 126.
7. Zhou T., Lin X., et al. // Nat. Photonics. 2021. V. 15 (5). P. 367-373.

УДК 535(06)+004(06)

Ч.Б. КАЙТУКОВ, С.И. ЗАЙЦЕВ[1], А.А. СВИНЦОВ[1]
Научно-технический центр «Атлас», Москва
[1]Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН, Черноголовка

ФОРМИРОВАНИЕ СКРУЧЕННЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ В ЗАЩИТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЗНАКАХ

Приведены результаты расчёта и изготовления дифракционных элементов для формирования скрученных световых пучков и их использования в защитных оптических знаках. Исследовалось влияние положения источника света на качество изображения при восстановлении (считывании), а также его протяжённости и спектрального состава.

Ch.B. KAYTUKOV, S.I. ZAITSEV[1], A.A. SVINTSOV[1]
Science Technical Center «Atlas», Moscow
[1]Institute of Microelectronics Technology and High-Purity Materials of the RAS, Chernogolovka

FORMATION OF TWISTED LIGHT BEAMS IN PROTECTIVE OPTICAL SIGNS

The results of the calculation and manufacture of diffraction elements for the formation of twisted light beams and their use in protective optical signs are presented. The influence of the position of the light source on the image quality during reconstruction (reading), as well as its length and spectral composition, was studied.

Защитные оптические знаки, применяемые для защиты от подделок товаров и документов, должны постоянно дополняться новыми защитными признаками, так как они сами являются объектами подделок и фальсификаций. Рассматривают три уровня проверки подлинности оптических признаков, это визуальный, приборный и экспертный контроль. Приборный контроль подразумевает исследование дифракционного защитного знака специализированным (либо стандартным) прибором. Признаки, которые визуализируются с помощью приборов, называют скрытыми. Простым примером скрытого признака является микротекст или микроизображение. Такой скрытый признак визуализируется при помощи увеличительного прибора, например, линзы.

В работе исследовалась возможность использования спиральных пучков света в качестве нового скрытого признака защитных оптических

знаков. Спиральные световые пучки – это пучки света, которые сохраняют структуру своей интенсивности при распространении с точностью до масштаба и вращения [1]. Истинно спиральные пучки, поворот в которых превышает угол 2π, могут быть синтезированы как пучки Лагерра–Гаусса, однако ограничения, которые накладывает такой подход на входные изображения, не позволяют их широко использовать в качестве защитного оптического признака приборного контроля. Если ограничить угол поворота изображения до π/4, спиральный пучок можно представить совокупностью прямых лучей. На рис. 1 представлен пример такого спирального пучка. Тремя секущими плоскостями представлены распределения интенсивности в пучке. Если соединить не четыре, а все соответствующие точки на окружности, то получится гиперболоид [1].

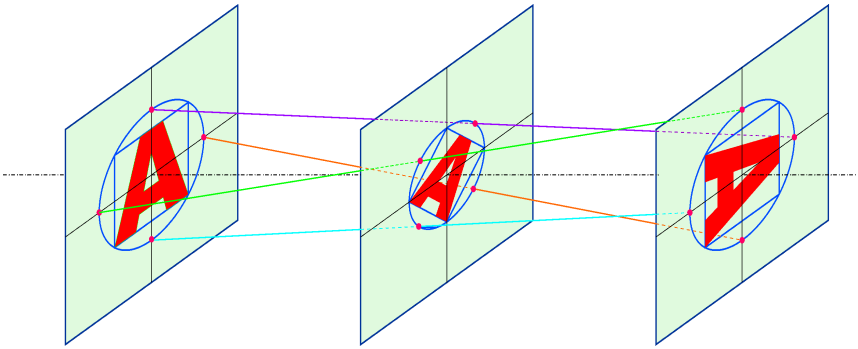


Рис. 1. Схема спирального пучка построенного прямыми лучами

Принятое ограничение по углу поворота изображения позволяет произвести расчёт отражательной фазовой поверхности защитного оптического знака дискретно, независимо для каждого луча [2].

Прибором для считывания скрытого признака, если его можно так назвать, служит лазерная указка и матовый экран. Изображение на защитном знаке освещается через матовый экран лазером для имитации точечного источника, а проекция спирального пучка проецируется на матовый экран. При изменении расстояния от защитного знака до матового экрана, наблюдается поворот изображения и, таким образом, происходит идентификация подлинности.

Список литературы

1. Волостников В.Г. // Методы анализа и синтеза когерентных световых полей. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014.

2. Harvey J.E., Vernold C.L. // Applied Optics. 1998. V. 37. P. 8158-8160.

УДК 535(06)+004(06)

А.Ю. СЕТЕЙКИН[1,2], И.В. КРАСНИКОВ[1]
[1]*Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград*
[2]*Амурский государственный университет, Благовещенск*

ПОДХОДЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В БИОМЕДИЦИНСКОЙ ОПТИКЕ

Моделирование методом Монте-Карло (МК) распространения света в рассеивающих и поглощающих средах много лет является золотым стандартом для изучения взаимодействия света с биологическими тканями и используется в самых разных случаях. Взаимодействие фотонов со средой моделируется на основе её оптических свойств и исходного приближения фазовой функции рассеяния. В работе представлен краткий обзор основных подходов моделирования и аспектов взаимодействия оптического излучения с биологическими тканями.

A.Yu. SETEYKIN[1,2], I.V. KRASNIKOV[1]
[1]*Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad*
[2]*Amur State University, Blagoveshchensk*

APPROACHES TO APPLYING MATHEMATICAL MODELING METHODS IN BIOMEDICAL OPTICS

Monte Carlo simulation of light propagation in scattering and absorbing media has been the gold standard for studying the interaction of light with biological tissues and is used in a variety of cases. The interaction of photons with a medium is modeled based on its optical properties and the initial approximation of the scattering phase function. This paper provides a brief overview of the main approaches to mathematical modeling and aspects of the interaction of optical radiation with biological tissues.

Прорыв в области неоперативных методов диагностики, какой в своё время обеспечивали рентген и компьютерная томография, теперь можно ожидать от оптической визуализации благодаря использованию неионизирующего излучения и его неинвазивности [1]. В биомедицине их потенциал изучен далеко не полностью [2].

Моделирование распространения света в среде основано на характеристиках поглощения и рассеяния, доминирующих при распространении света в биологических тканях. Распространённым подходом к моделированию распространения света в среде является использование уравнения переноса излучения (УПИ). Было предложено

несколько численных решений для УПИ, основанных на подходящих приближениях [3].

Как правило, при моделировании МК через исследуемую среду (ткань) распространяется большое количество фотонов. Фотоны могут претерпевать отражение, преломление, поглощение или рассеяние [4 - 6].

Геометрия среды, в которой моделируется распространение света, может быть определена в зависимости от потребностей моделирования. Для рассеяния полярный угол θ и азимутальный угол φ рассеянного фотона зависят от оптических свойств ткани и выборки случайных значений. Угол θ вычисляется с использованием фазовой функции Хеньи-Гринштейна. Некоторые авторы [7 - 9] также вводят решение в виде цепи Маркова для моделирования многократного рассеяния фотонов через мутные среды посредством процессов анизотропного рассеяния, то есть рассеяния Ми. Схема процесса цепи Маркова для анизотропного рассеяния показана на рис. 1. На схеме мутная пластина дискретизирована на несколько слоёв с одинаковой толщиной и оптические свойства каждого слоя одинаковы. Методы моделирования, представленные в этом обзоре, в основном ориентированы на биомедицинскую оптическую визуализацию и спектроскопию. Дополнительные преимущества будут получены за счёт постоянно растущей доступной вычислительной мощности и концепций искусственного интеллекта, таких как машинное обучение и концепции глубокого обучения.

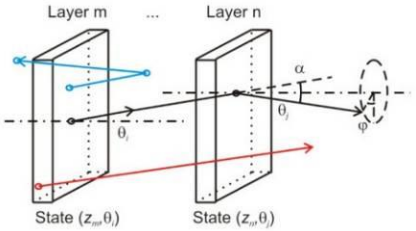


Рис. 1. Схема многократного рассеяния, смоделированная моделью цепи Маркова

Список литературы

1. Wang L.V., Wu H.-I. // Biomedical Optics: Principles and Imaging. 2009.
2. Yun S.H., Kwok S.J. // Nature Biomed. Eng. 2017. V. 1. P. 0008.
3. Liu K., et al. // Opt. Express. 2010. V. 18. P. 20988-21002.
4. Wang L., Jacques L. // Proc. SPIE. 1994. V. 2134. P. 2134A.
5. Periyasamy V., Pramanik M. // IEEE reviews in biomedical engeneering. 2017. V. 10
6. Welch A., VanGemert M.// Optical-Thermal Response of Laser-Irradiated Tissue. 2011. V. 2.
7. Lin Y., Northrop W.F., Li X. // Optics Express. 2016. V. 24 (23). P. 26942-26947.
8. Xu F., Davis A., Sanghavi S., Martonchik J., Diner D.// App.Optics.2012. V. 51(16). P. 3491.
9. Zhu C., Liu Q. // J. Biomed. Opt. 2013. V. 18, P. 50902.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. ПАВЛОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

КОРРЕЛЯЦИОННОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ НЕЛИНЕЙНЫМИ МУЛЬТИПЛЕКСНЫМИ ГОЛОГРАММАМИ ФУРЬЕ

Рассмотрен отклик, формируемый квадратичной компонентой мультиплексной голограммы Фурье, записанной с угловым разнесением опорных пучков при квадратичной нелинейности экспозиционной характеристики голографической регистрирующей среды. Показано восстановление эталона на основе функции его корреляции с другим, независимо записанным эталоном, и инверсия их весов.

A.V. PAVLOV
ITMO University, Saint-Petersburg

CORRELATION IMAGE RESTORATION BY NONLINEAR MULTIPLEX FOURIER HOLOGRAMS

The response formed by the quadratic component of a multiplex Fourier hologram recorded with angular multiplication of plane reference beams under quadratic non-linearity of the holographic recording medium exposure characteristic is considered. The restoration of a reference image based on the function of its correlation with another independently recorded reference image, and its weighs' inversion are shown.

В [1, 2] показано, что при записи наложенных голограмм (НГ) Фурье по схеме с разнесением опорных источников на среде с квадратичной нелинейностью, формируются субголограммы, связывающие эталоны A(x, y) и B(x, y). В работе показано восстановление субголограммами эталона на основе функции корреляции входного поля с другим эталоном.

Отклик квадратичной субголограммы на входное поле In(x, y)

$$\mathrm{B}^R\left(\Delta_x,\Delta_y\right) \propto \mathrm{B}\left(x,y\right)*\left[\mathrm{In}\left(x,y\right)\otimes\mathrm{A}\left(x,y\right)\right]*\delta\left(x_B-x_A\right)\ , \qquad (1)$$

где * и ⊗ – символы свёртки и корреляции, x_A, x_B – координаты точечных опорных источников. Если по мере отношения скалярных произведений один эталон, например, A(x, y), доминирует B(x, y), то в отклике имеем обратную ситуацию – доминирует уже B^R(x, y), а A(x,y) ослабляется.

Входное и эталонное поля представлены реализациями дельта-коррелированного случайного поля. Площадь эталона A(x, y) не менялась, площадь эталона B(x, y) менялась и оценивалась параметром $r = S^A / S^B$.

На рис. 1 показан пример входного поля, содержащего эталоны и фон, на рис. 2 – отклик (1) при $r = 1.044$, на рис. 3 – при $r = 31.595$. На рис. 4 даны зависимости среднего модуля амплитуд откликов $B^R(x, y)$ и $A^R(x, y)$ от r.

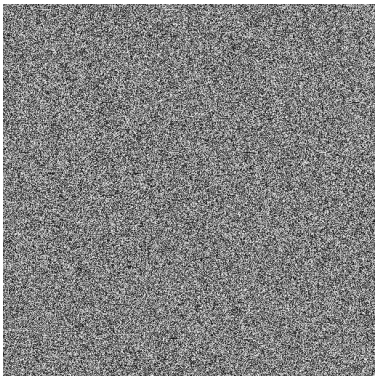


Рис. 1. Входное поле

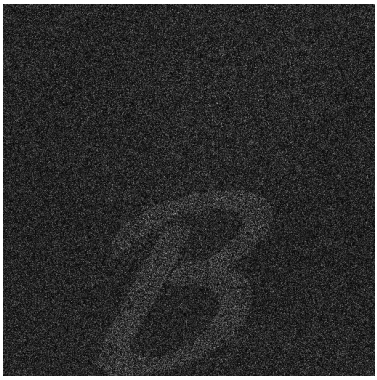


Рис. 2. Отклик при $r = 1$

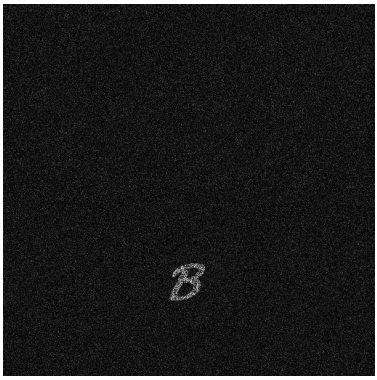


Рис. 3. Отклик при $r = 31.595$

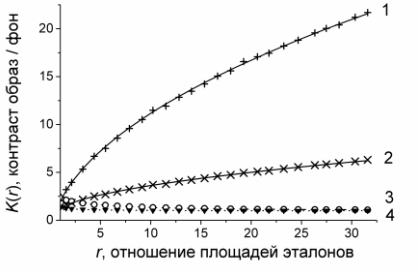


Рис. 4. Зависимости контраста восстановленного образа от r: 1, 2 – $B^R(x, y)$, 3, 4 – $A^R(x, y)$, 1, 3 – без фона, 2. 4 – с фоном в $In^R(x, y)$

Таким образом, имеем метод восстановления эталона на основе его корреляции с другим эталоном за счёт квадратичной нелинейности записи наложенных голограмм. Особенность метода – рост его эффективности с уменьшением размера восстанавливаемого эталона относительно второго.

Список литературы

1. Orlov V.V. // Technical Physics Letters. 2004. V. 30 (12), P. 1054-1056.
2. Pavlov A.V., Orlov V.V. // Quantum Electronics. 2019. V. 49 (3). P. 246-252.

УДК 535(06)+004(06)

А.Ю. БЫКОВСКИЙ
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

СТРУКТУРА КОДИРОВАННЫХ СЛОВАРЕЙ ПАРАМЕТРОВ СЦЕНЫ ДЛЯ МНОГОЗНАЧНО-ЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ АГЕНТОВ

Обсуждается взаимосвязанная структура кодированных параметров, описывающих сцену действия и параметры группы агентов в виде логического кода. Методика предназначена для удаленной верификации параметров роботизированных агентов и коррекции их модели мира.

A.Yu. BYKOVSKY
Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

CODED VOCABULARIES STRUCTURE OF THE SCENE PARAMETETRS FOR MULTIPLE-VALUED MODELLING OF AGENTS SYSTEMS

The interrelated structure of coded scene parameters is discussed, describing the scene of action and robotic group parameters by the logic code. The method is intended for the distant verification of robotic agents parameters and the correction of their robotic word model.

Сложность построения модели мира робота (robotic world model) [1] для агента и коллектива агентов заключается в отсутствии единой постоянно задействованной структуры формализмов, описывающих работу агента и таких его подсистем, как, например, модули компьютерного зрения, позиционирования и исполнительных устройств. Необходимо использовать различные динамические структуры подпрограмм для интерпретации сцены действия, технических объектов, поведения других роботов и людей. Кроме того, для коллектива автономных агентов требуются средства диалогового обмена информацией и удаленной верификации данных для проверки совместимости библиотек подпрограмм и оборудования, сверки заданий, ресурсов, а также коррекции поведения агента.

Целью работы является исследование возможностей упорядоченной трёхуровневой структуры кодов, взаимнооднозначно отображающей робототехнические термины естественного языка на шкалы натуральных чисел и логических уровней истинности многозначной алгебры Аллена–

Живона [2]. На основе её полной системы логических операторов $< 0,\ 1, \ldots,\ K-1,\ Literal\,X(a,b), MIN,\ MAX >$ удается построить простую схему логического языка диалога агентов, протокол обмена кодовыми логическими фразами и верификации корректного построения фраз агентов, передаваемых в виде восьмибайтных фрагментов. Фразы составляют из кодированных слов различных словарей $V_{v,m}^{K}$, заданных как в логическом коде, так и с помощью случайного кода заданного в натуральных числах. Фраза состоит из заголовка и контентных частей:

Заголовок, 8-байт	Формат, код из $V_{1,1}^{K}$	Пароль, код из $V_{1,2}^{K}$	Адресат 1й байт, $V_{1,4}^{K}$	Адресат 2й байт, $V_{2,4}^{K}$	…	Отправит. 1й байт, $V_{1,5}^{K}$	Отправит. 2й байт, $V_{2,5}^{K}$	…
Контент 1	Хэш, $V_{1,3}^{K}$	Произв слово, $V_{v,m}^{K}$	Произв слово, $V_{v,m}^{K}$	...	...	Произв слово, $V_{v,m}^{K}$	Произв слово, $V_{v,m}^{K}$	Провер очная сумма кодов

Методика включает схемы подтверждения данных с помощью одноразовых квазислучайных хэшей, верификации целостности фраз, а также нескольких схем работы с логическим связанным списком, используемым для защищённого хранения критических данных. Ряд алгоритмов и подходящая аппаратная база показаны на примере микроассемблерных подпрограмм и восьмибитных микроконтроллерных схем уровня IoT.

Представленная методика упрощает передачу данных между агентами и даёт возможность перейти к рассмотрению схем автономной коррекции модели поведения и инструментария агентов, описываемой структурой логических словарей.

Список литературы

1. Sakagami R.; Lay F.S., et al.// Front. Robot. AI, Sec. Robotic Contr. Syst. 2023. V. 10. P. 1253049.

2. Bykovsky A. // Quantum Rep. 2020. V. 2. P. 126.

УДК 535(06)+004(06)

П.В. КОРОЛЕНКО[1,2], Р.Т. КУБАНОВ[1], А.Ю. МИШИН[1]
[1]*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*
[2]*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ ФРАКТАЛЬНЫХ СТРУКТУР

Проанализирован скейлинг пространственных спектров регулярных и стохастических фрактальных структур, сформированных в когерентном и некогерентном свете. Показано, что контрастность пространственных спектров растёт с увеличением фрактальной размерности излучения и снижается с уширением переходной функции оптической системы.

P.V. KOROLENKO[1,2], R.T. KUBANOV[1], M.Yu. MISHIN[1]
[1]*Lomonosov Moscow State University*
[2]*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

SPECTRAL PROPERTIES OF IMAGES OF FRACTAL STRUCTURES

The scaling of spatial spectra of regular and stochastic fractal structures formed in coherent and incoherent light is analyzed. It is shown that the contrast of spatial spectra increases with increasing fractal dimension of radiation and decreases with broadening of the transition function of the optical system.

Литературные данные и результаты специальных исследований в области медицины указывают на то, что высокая эффективность воздействия фрактального излучения на пациентов в сеансах арттерапии, а также при лечении глазных болезней связана со скейлингом (масштабной инвариантностью) его пространственного спектра [1]. Поскольку информация поступает в кору головного мозга человека по частотно селективным каналам [2], такая структура спектра наиболее быстро и эффективно перерабатывается мозговой нейронной сетью. Важное значение при проведении светостимуляционной терапии имеет правильная организация оптического тракта.

Целью работы является оценка степени трансформации пространственных спектров фрактальных объектов при формировании их изображений в оптических системах общего вида. Для построения фрактальных структур использовалась двумерная фрактальная функция Вейерштрасса [1], которая характеризовалась коэффициентом скейлинга

равным $b = 2$. На рис. 1 показана трансформация пространственного спектра одной из реализаций световой структуры в результате прохождения излучения через оптическую систему с гауссовой переходной функцией. Структура спектра на входе и выходе системы определялась фурье-образом $F_{p,q}$ распределения светового поля (p, q – пространственные частоты). Значения $F_{p,q}$ определялись с помощью процедуры быстрого фурье–преобразования. Видно, что отношение частотных сдвигов пиков 2 и 1 от нулевой частоты в изначальной структуре и в её изображении равно величине b. Это указывает на устойчивость скейлинга в спектральных характеристиках световых пучков. Важно отметить, что контрастность пространственного спектра возрастала при увеличении фрактальной размерности излучения.

В ходе анализа преобразования фрактального излучения в оптических системах были сопоставлены данные получаемые в когерентном, и некогерентном свете. Сопоставление показало, что корреляция распределения поля на входе и выходе оптической системы оказывается выше в некогерентном случае.

Полученные результаты могут быть использованы в медицине при совершенствовании методов светотерапии.

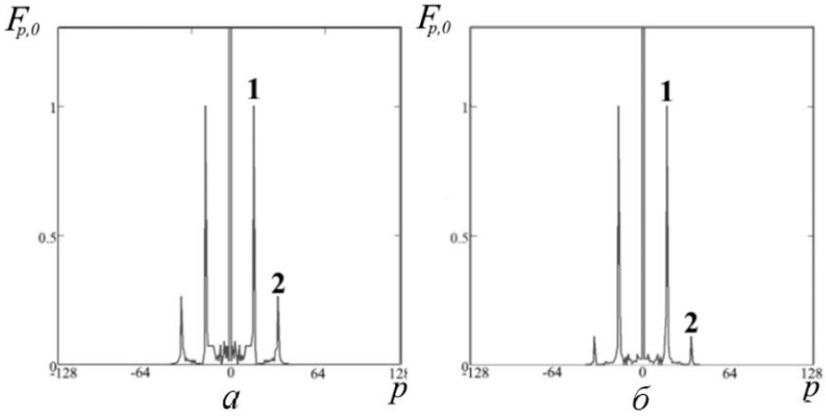


Рис. 1. Пространственные спектры изначальной структуры (*а*) и её изображения (*б*)

Список литературы

1. Зотов А.М., Короленко П.В. и др. // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. 2019. № 6. С. 52.

2. Шелепин Ю.Е. Введение в нейроиконику: монография. СПб.: Троицкий мост, 2017.

УДК 535(06)+004(06)

А.Н. ПУТИЛИН[1,2], С.Е. ДУБЫНИН[1], Н.А. ПУТИЛИН[1,2],
С.С. КОПЁНКИН[1,2,3], Ю.П. БОРОДИН[1,2,3]
[1]*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*
[2]*Московский государственный университет геодезии и картографии*
[3]*МИРЭА – Российский технологический университет*

УГЛОВЫЕ ДИАПАЗОНЫ РАБОТЫ ВОЛНОВОДНЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ПЕРИСКОПОВ В СХЕМАХ ДИСПЛЕЕВ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Приведены результаты исследования ограничений в угловых диапазонах работы волноводных голографических перископов (ВГП) в схемах устройств дополненной реальности. Проанализированы различные схемы построения ВГП и связанные с этим ограничения, рассмотрено влияние параметров ВГП на рабочие угловые диапазоны. Рассмотрены пути увеличения углового поля дисплеев дополненной реальности на основе ВГП.

A.N. PUTILIN[1,2], S.E. DUBYNIN[1], N.A. PUTILIN[1,2],
S.S. KOPENKIN[1,2,3], Yu.P. BORODIN[1,2,3]
[1]*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*
[2]*Moscow State University of Geodesy and Cartography*
[3]*MIREA – Russian Technological University*

WORKING RANGE OF WAVEGUIDE HOLOGRAPHIC PERISCOPES IN AUGMENTED REALITY DISPLAY SCHEMES

Presents the result of working angular apertures limitation investigations for waveguide holographic periscopes (WHP) in the schemes of augmented reality devices. Various schemes for WHP design and there specific operation limitations are analysed. The influence of WHP parameters on the working angular ranges are analysed too. We consider the ways for increasing of the angular apertures of augmented reality displays.

Волноводные голографические перископы (ВГП) получили на данный момент весьма широкое распространение в качестве бим-комбайнеров (совместителей пучков) в устройствах дополненной реальности [1, 2]. Их главным достоинством является обеспечение мультипликации (увеличения) выходного зрачка системы. Однако имеются и недостатки, к главным из них относят ограничения в угловом диапазоне, в котором ВГП сохраняет работоспособность. Целью данной работы является моделирование и экспериментальное исследование такого типа

ограничений для разных схем ВГП, а также выявление путей их преодоления.

Для описания процесса волноводной дифракции традиционно применяются векторные диаграммы, однако обычно ограничиваются приведением схематических рисунков [3, 4]. Авторами была разработана специализированная программа для численной оценки угловых диапазонов работы ВГП. На рис. 1а приведён пример оценки углового диапазона для схемы типа Microsoft Hololens 1 при $n = 1{,}5$ и максимальном угле в волноводе $\alpha = 70°$ (определяется толщиной волновода и апертурой проектора). Увеличение показателя преломления волновода приводит к увеличению углового диапазона (рис. 1б, $n = 1{,}8$), причём эта зависимость носит практически линейный характер. Один из подходов к увеличению углового поля – использование балансных схем (рис. 1в). При этом возможно и множество иных вариантов, в том числе и при довольно сильном упрощении схемы. Так, на рис. 1г приведена схема с однокоординатным размножением, в которой обеспечивается угловой диапазон почти вплоть до 180 ° по горизонтали.

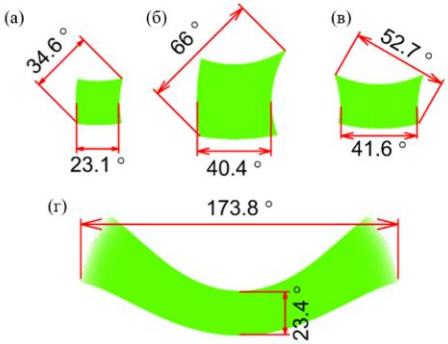


Рис. 1. Векторные схемы дифракции для различных схем ВГП:
Hololens 1, $n = 1{,}5$ (а); Hololens 1, $n = 1{,}8$ (б); Hololens 2, $n = 1{,}5$ (в);
схема с однокоординатной мультипликацией выходного зрачка, $n = 1{,}5$ (г)

В работе были рассмотрены как известные схемы, так и некоторые оригинальные решения. Результаты моделирования сопоставлялись с экспериментальными результатами.

Список литературы

1. Cheng D., Wang Q., et al. // Light: Advanced Manufacturing. 2021. V. 2. No. 3. P. 350-369.
2. Putilin A.N., Morozov V.N., et al. // Optical engineering. 1991. V. 30. No. 10. P. 1615-1620.
3. Ding Y., Yang Q., et al. // eLight. 2023. V. 3.No. 1. P. 24-58.
4. Kress B.C., Pace M. // Light: Advanced Manufacturing. 2022. V. 3. No, 4. P. 771-801.

С.А. ШОЙДИН, А.Л. ПАЗОЕВ
Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск

ЛАТЕРАЛЬНЫЙ ПАТТЕРН СТРУКТУРИРОВАННОГО СВЕТА И ГОЛОГРАФИЯ

Приведены результаты синтеза цифровых голограмм и регистрации паттерна структурированного света, латерально освещающего 3D-объект голографирования. Показано, что последний имеет свойства голограмм, записанных в радиодиапазоне. Приведены способы перевода такой радиоголограммы в голограмму, восстанавливающую 3D-изображение записанного объекта в видимом диапазоне длин волн. Проведено сравнение исходного голографируемого 3D-объекта с его образами, восстановленными цифровой голограммой и таким паттерном структурированного света.

S.A. SHOYDIN, A.L. PAZOEV
Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk

LATERAL PATTERN OF STRUCTURED LIGHT AND HOLOGRAPHY

Presents the result of digital hologram synthesis and registration of a pattern of structured light illuminating a 3D holographic object from the side. It is shown that the latter has the properties of holograms recorded in the radio range. The simplest methods of transforming such a radio hologram into a hologram reconstructing a 3D image of the recorded object in the visible wavelength range are presented. A comparison of the original holographic 3D object with its images reconstructed by a digital hologram and such a pattern of structured light is performed.

Первые упоминания о спектрах интерферограмм известны из работы Брингдала и Ломана [1], в которой авторы высказали догадку о возможности восстановления карты глубин по спектрам Фурье этих интерферограмм. Там же была отмечена возможность изменять несущую частоту фурье-спектров, после чего авторы перешли к измерительным задачам. М. Такеда [2], в свою очередь, заметил, что численным методом выделив спектр минус первого порядка из спектра структурированных полос, можно обратным преобразованием Фурье сформировать 3D-карту глубин объекта, не связав это со свойствами дифракции света на такой структуре.

Впервые утверждение, что на зарегистрированном в материальном носителе паттерне структурированного света происходит дифракция, аналогичная дифракции на голограмме, было заявлено в [3]. Причём период исходной структуры паттерна структурированного света говорит о карте высот 3D-объекта, полученной в радиодиапазоне. Очевидно, что в видимом диапазоне карта высот должна быть такой же. В настоящей работе показано, что 3D-изображение, восстановленное при дифракции на структуре, сформированной образованной паттерном структурированного света, преобразованного изменением несущей пространственной частоты в видимый диапазон, близко как к исходному изображению 3D-объекта, так и к изображению, восстановленному голограммой (рис. 1), они имеют похожие карты высот. Обсуждаются причины их сходства и отличий.

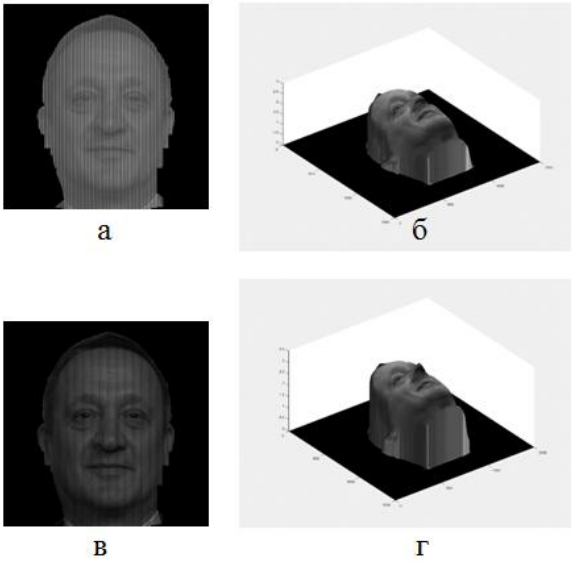


Рис. 1. Голограмма (а), восстановленное ей изображение (б), паттерн структурированного света (в), восстановленное им изображение (г)

Список литературы

1. Bryngdahl O., Lohmann A.W. // J. Opt. Soc. Am. 1968. V. 58. P. 141-142.
2. Takeda M. // Applied Optics. 2012. V. 52. P. 20-29.
3. Shoydin S.A., Pazoev A.L. // Appl. Sciences. 2023. V. 13 (6). P. 4037.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. ЧЕРНЫХ[1], Т.В. РЕЗЦОВ[1], Т.Н. ОРЛОВА[1,2], Н.В. ПЕТРОВ[1]
[1]*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*
[2]*Ереванский государственный университет, Армения*

ОДНОЭКСПОЗИЦИОННЫЙ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ МИКРОСКОП ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ АРХИТЕКТУР В ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ

Разработан поляризационный голографический микроскоп на основе интерферометра Рождественского и поляризационного матричного фотодетектора, который способен за одну экспозицию регистрировать полное состояние оптического векторного поля, формируемого анизотропными образцами. Предложенный микроскоп был использован для исследований топологии хиральных архитектур жидких кристаллов.

A.V. CHERNYKH[1], T.V. REZTSOV[1], T.N. ORLOVA[1,2], N.V. PETROV[1]
[1]*ITMO University, Saint-Petersburg*
[2]*Yerevan State University, Armenia*

SINGLESHOT POLARIZATION HOLOGRAPHIC MICROSCOPE FOR STUDIES OF TOPOLOGICAL ARCHITECTURES IN LIQUID CRYSTALS

Polarization holographic microscope based on the Rozhdestvensky interferometer and polarization matrix photodetector has been developed, which is able to register the complete state of the optical vector field formed by anisotropic samples in one exposure. The proposed microscope has been used to study the topology of chiral architectures of liquid crystals.

Цифровая голографическая микроскопия является эффективным инструментом количественной фазовой визуализации оптических прозрачных образцов и отражающих поверхностей [1, 2]. Однако, в случае наличия у образцов анизотропных свойств двулучепреломления и поляризационной чувствительности конвенциональная цифровая голография может давать неполную или ошибочную информацию оптических свойств материалов. В данной работе мы представляем цифровой голографический микроскоп, способный восстанавливать амплитудно-фазовое распределение поля образцов в двух ортогональных состояний поляризации, то есть полное векторное поле.

Разработанный поляризационный голографический микроскоп собран на основе интерферометрической схемы Рождественского с входным лазерным излучением с круговой поляризацией. В качестве приёмника используется поляризационный матричный фотодетектор FLIR BFS-U3-51S5P-C, который представляет собой КМОП-матрицу с массивом микрополяризаторов. Над каждым квадрантом пикселей камеры расположен линейный микрополяризатор с соответствующим направлением поворота на 0, 45, 90 и 135 °. Благодаря данной поляризационной камере мы можем одновременно регистрировать четыре внеосевые цифровые голограммы, из которых восстанавливаем амплитудно-фазовые распределения векторного поля используя формализм Джонса. Поляризационный голографический микроскоп был сопряжён с системой накачки инфракрасного (1040 нм) фемтосекудngого (200 фс) импульсного излучения через дихроичное зеркало, которое направляло пучок накачки в объектив микроскопа. Таким образом пробный пучок и пучок накачки освещали образец в противоположных направлениях. Размер фокусного пятна накачки составлял порядка 5 мкм с общей средней мощностью 30 мВт.

Система микроскопа была использована для исследования динамики формирования топологических хиральных архитектур [3] в жидких кристаллах (ЖК) под воздействием сфокусированного инфракрасного излучения. Образцы ЖК располагались между стеклянными подложками с плёнками оксида индия-олова, которые обеспечивали эффективный локальный нагрев. В области фокуса в течение 1 - 2 с происходило формирование тороидальной структуры диаметром 12 мкм (торон S1). Данные тороны обладают свойствами совмещённой хроматической микролинзы с q-пластиной единичного заряда, и их можно рассматривать не только как отдельные микрогенераторы вихревых и векторных пучков, но и как базовые компоненты для поляризационных дифракционных элементов, что представляет интерес для разработки новых перспективных материалов фотоники.

Авторы выражают благодарность за финансовую поддержку Министерству науки и высшего образования Российской Федерации (№ FSER-2025-0007).

Список литературы

1. Wang Z., et al. // Light Adv. Manuf. 2022. V. 3(1). P. 151.
2. Kim M.K., et al. // JPE. 2010. V. 1. No. 1. P. 018005.
3. Ackerman P.J. // Phys. Rev. E. 2012. V. 86. No. 2. P. 021703.

УДК 535(06)+004(06)

А.М. КОЖЕВНИКОВА, И.В. АЛЕКСЕЕНКО, Д.В. ШИТЦ
Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград

ЦИФРОВАЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ АПОКАМПИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

Предложен метод и описан автоматизированный комплекс цифровой голографической интерферометрии, разработанный для исследования параметров апокампической плазмы, генерируемой в импульсном режиме. Рассмотрены особенности синхронизации регистрирующих устройств с генерацией импульсов плазмы. Также представлены результаты наблюдения импульса плазмы, полученные методами цифровой голографической интерферометрии.

A.M. KOZHEVNIKOVA, I.V. ALEKSEENKO, D.V. SHITZ
Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad

DIGITAL HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY FOR APOKAMP DISCHARGE ANALYSIS

In this report we propose a method of digital holographic interferometry and automated laboratory unit developed to determine the parameters of apokamp discharge in pulse mode. The peculiarities of recording devices synchronization with the plasma pulses are considered. The results of plasma pulse detection and phase maps corresponding to refractive index changing are also represented.

Стримерные разряды, не переходящие в искровой канал, в настоящее время широко исследуются. Одним из разновидностей таких разрядов является апокампический разряд [1], в котором при высокой частоте следования импульсов напряжения стримеры стартуют от диффузного искрового канала, имеющего изогнутую форму. Применение методов голографической интерферометрии для оценки параметров плазмы давно известно [2, 3], однако, для оценки концентрации электронов в плазме, формирующей апокамп, метод цифрового голографического сканирования применён впервые. Он основан на сравнении фаз двух оптических волновых фронтов, зарегистрированных в разные моменты времени в виде цифровых голограмм, где результат сравнения фаз между волновыми фронтами представлен в виде численно рассчитанной картины разности фаз восстановленных волновых фронтов. Газоразрядная плазма является фазовым (прозрачным) объектом, и интерференционные полосы

образуются в результате изменения показателя преломления, вносимого плазмой по отношению к исходной невозмущённой среде. Полученное значение показателя преломления позволяет оценить концентрацию электронов в плазме искрового канала.

Исследуемый динамический процесс требует оптимальной синхронизации системы захвата изображения, генерации лазерного излучения и генерации плазмы. Синхронизация и управление устройствами осуществлялась с использованием программно-аппаратных средств National Instruments. Регистрация изображений осуществлялась по схеме записи голограмм сфокусированного изображения (рис. 1). Расчёт интерференционных полос, соответствующих разности фаз между двумя состояниями объекта, осуществлялся методом фурье-анализа. В работе представлены результаты регистрации плазмы как фазового объекта (рис. 2). Полученные интерференционные изображения позволяют оценивать концентрацию электронов через определение показателя преломления плазмы.

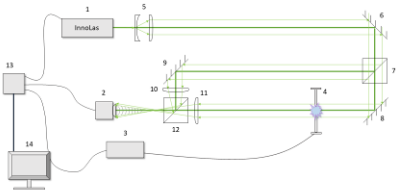
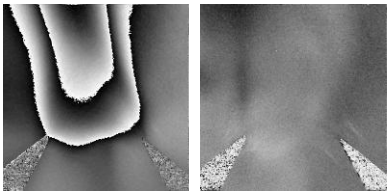


Рис. 1. Схема цифрового голографического комплекса для исследования апокампической плазмы в импульсном режиме генерации



а *б*

Рис. 2. Изменения фазы излучения в момент генерации апокампической плазмы: в сравнении с невозмущённым состоянием среды (*а*), в сравнении со средой в межимпульсный промежуток времени (*б*)

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-79-00023).

Список литературы

1. Skakun V.S., Panarin V.A., Pechenitsyn D.S. Sosnin E.A., Tarasenko V.F. Formation of an apokampic discharge under atmospheric pressure conditions // Russ. Phys. J. 2016. V. 59 (5). P. 707-711.

2. Ostrovskaya G.V., Ostrovsky Yu.I. Holographic methods of plasma diagnostics // Progress in optics. Elsevier, 1985. V. 22. P. 197-270.

3. Зайдель А.Н. Применение голографической интерферометрии для диагностики плазмы //Успехи физических наук. 1986. Т. 149. № 5. С. 105-138.

УДК 535(06)+004(06)

А.П. МАНЯК, А.В. КРЕТУШЕВ
МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФАЗЫ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ МИКРОСКОПИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВРЕМЕННОГО ГИЛЬБЕРТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

В работе представлено моделирование восстановления фазовых изображений динамического объекта в интерференционном микроскопе с помощью гильберт-преобразования изменяющихся во времени интерференционных изображений. В качестве исследуемого объекта была выбрана математическая модель сферической поверхности. Динамика объекта моделировалась за счёт изменения показателя преломления во времени.

A.P. MANYAK, A.V. KRETUSHEV
MIREA – Russian Technological University, Moscow

MODELING OF PHASE RECONSTRUCTION OF DYNAMIC OBJECTS IN INTERFERENCE MICROSCOPY USING A TEMPORARY HILBERT TRANSFORM

The paper presents a simulation of the reconstruction of phase images of a dynamic object in an interference microscope using the Hilbert transform of time-varying interference images. A mathematical model of a spherical surface was chosen as the object under study. The dynamics of the object was modeled by changing the refractive index over time.

Изучение динамических процессов на молекулярных и клеточных уровнях представляют собой одно из важных направлений в области биологии и медицины. Проведение количественных измерений столь малых структур проблематично, особенно традиционными методам микроскопии. Одним из направлений, позволяющих решить проблему исследования состояния и поведения субклеточных структур, является фазовая микроскопия. В рамках данного направления было разработано множество приборов и методов, позволяющих с высокой точностью и без непосредственного воздействия на объект получать о нём пространственную и количественную информацию об изменении фазовой высоты исследуемых структур. Одним из таких методов является гильберт-преобразование [1]. Данный метод зарекомендовал себя в

исследованиях быстрых явлений, протекающих в прозрачных структурах. Однако, при больших увеличениях количество наблюдаемых в изображении интерференционных полос недостаточно для качественного восстановления фазового изображения. В данной работе предложено решение проблемы, за счёт применения гильберт-преобразования во временной плоскости.

Целью данной работы является моделирование восстановления фазовых изображений динамического объекта в интерференционном микроскопе с помощью временного гильберт-преобразования. В качестве модели исследуемого динамического объекта была выбрана сферическая поверхность [2], движение которой было воссоздано за счёт изменения её собственного показателя преломления во времени. В работе [2] представлена схема модели интерференционного микроскопа, в которой по линейному закону изменяется положение опорного зеркала и регистрируется для каждого момента времени своя интерференционная картина с учётом показателя преломления объекта (рис. 1). Затем применяя гильберт-преобразование для каждой точки пространства во времени выполняется восстановление кадров.

Результат работы алгоритма через воссоздание графика изменения показателя преломления в центральном пикселе изображения во времени представлен на рис. 2.

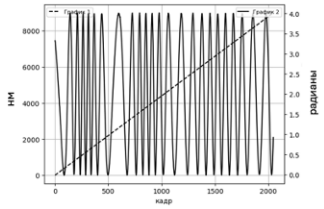


Рис. 1. График изменения интерференционного сигнала в центре изображения

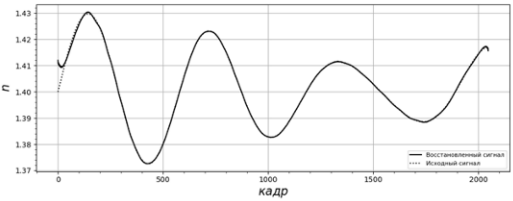


Рис. 2. График восстановленного изменения показателя преломления объекта во времени

Список литературы

1. Wang S., Xue L., Lai J., Li Z. An improved phase retrieval method based on Hilbert transform in interferometric microscopy // Optik. 2013. V. 124. No. 14. P. 1897-1901.

2. Маняк А.П., Ширяев М.А., Кретушев А.В. Моделирование восстановления фазовых изображений с помощью временного Гильберт преобразования для фазовой микроскопии // Перспективные материалы и технологии (ПМТ-2024) : Сборник докладов Международной научно-технической конференции ИПТИП РТУ МИРЭА, Москва: МИРЭА, 2024. С. 456-462.

УДК 535(06)+004(06)

Л.Н. БОРОДИНА, Е.В. РАБОШ, И.В. МАРГАРЯН,
М.А. БАРАНОВ, Н.В. ПЕТРОВ, А.В. ВЕНИАМИНОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

КОНФОКАЛЬНАЯ МИКРОСКОПИЯ СТРУКТУРЫ ОБЪЁМНОЙ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ ГОЛОГРАММЫ

Приведены результаты визуализации дифракционной структуры объёмных отражательных голограмм с использованием конфокального микроскопа. Визуализация стала возможной благодаря кратному увеличению характерных размеров структуры при набухании эмульсии. Структура голограммы проявляется также на изображениях, полученных средствами электронной и атомно-силовой микроскопии. Однако только оптическая сканирующая микроскопия способна визуализировать модуляцию в объёме, несмотря на её, казалось бы, недостаточное пространственное разрешение.

L.N. BORODINA, E.V. RABOSH, I.V. MARGARYAN,
M.A. BARANOV, N.V. PETROV, A.V. VENIAMINOV
ITMO University, Saint-Petersburg

CONFOCAL MICROSCOPY OF A VOLUME REFLECTION-TYPE HOLOGRAM STRUCTURE

We present visualization of microscopic diffraction structure of volume reflection holograms using a confocal microscope. The visualization has become possible due to the increase in the characteristic scale of the structure caused by swelling of the gelatin emulsion. The structure was also revealed at the cross-cut and at the surface of the emulsion by means of scanning electron and atomic force microscopies. However, only optical scanning microscopy is capable of visualizing modulation in the media volume, despite its apparently insufficient resolution.

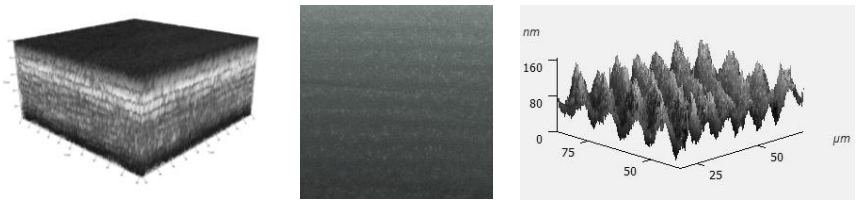
Голограммы как правило оцениваются по создаваемому ими изображению или их интегральному отклику как дифракционных оптических элементов, по которым и судят о характеристиках их структуры (пространственном периоде, ориентации и форме изофазных поверхностей, эффективной толщине, амплитуде показателя преломления и коэффициента поглощения). При этом для понимания физико-химических механизмов формирования голограмм требуется знание их микроскопической архитектуры и тонкой дифракционной структуры. Оптическая микроскопия позволяет наблюдать структуру пропускающих

голограмм с пространственными периодами от 0.4 - 0.5 мкм [1 - 3], но не объёмных отражательных голограмм, составляющих основу большинства изобразительных голограмм и многих селективных оптических элементов, период которых 0.15 - 0.2 мкм меньше аксиального пространственного разрешения оптического микроскопа в видимой спектральной области.

Электронная и зондовая микроскопии значительно превосходят оптическую по пространственному разрешению, но эти подходы не дают возможности проникнуть в объём голограммы.

В настоящей работе для наблюдения структуры объёмных отражательных голограмм применён подход, основанный на так называемой микроскопии расширения. Набухание желатиновой эмульсии дало возможность построить объёмное изображение структуры с использованием трёхмерного сканирования её сфокусированным лазерным лучом конфокального микроскопа (рис. 1*а*). Объёмное изображение структуры голограммы демонстрирует кратное увеличение её пространственных масштабов.

О характерных размерах структуры ненабухшей голограммы можно судить по изображениям поперечного скола эмульсии и рельефа, образованного выходящими на поверхность эмульсии голограммы дифракционными плоскостями с эффективным периодом 6 - 10 мкм, выявленным соответственно средствами сканирующей электронной и атомно-силовой микроскопии (рис. 1*б, в*).



а *б* *в*

Рис. 1. Изображение участка набухшей отражательной голограммы с периодом 3 мкм, полученное с помощью конфокального сканирующего микроскопа (*а*), электронно-микроскопическое (СЭМ) изображение сечения голограммы с периодом 0.2 мкм (*б*) и изображение поверхностного рельефа голограммы с атомно-силового микроскопа (*в*)

Список литературы

1. Tomita Y., et al // Journal of Modern Optics. 2016. V. 63 (3). P. 1-31.

2. Sabel T., Zschocher M. // Appl. Sci. 2014. V. 4. P. 19-27.

3. Ryskin A.I., Angervaks A.E., Veniaminov A.V. // Holographic Materials and Optical Systems / ed. by I. Naydenova. Intechopen, 2017. Ch. 18.

УДК 535(06)+004(06)

З.С. МАРКОВ, Т.З. МИНИХАНОВ, Е.Ю. ЗЛОКАЗОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИЗМЕРЕНИЕ АБЕРРАЦИЙ С ПОМОЩЬЮ КОГЕРЕНТНОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО МЕТОДА НА ОСНОВЕ СЛУЧАЙНЫХ ФАЗОВЫХ МАСОК

Приведены результаты экспериментов по измерению аберраций оптической системы с помощью когерентного вычислительного метода на основе случайных фазовых масок. Исследованы параметры фазовой модуляции, влияющие на скорость и эффективность работы итерационного алгоритма для фазовой визуализации.

Z.S. MARKOV, T.Z. MINIKHANOV, E.Yu. ZLOKAZOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

MEASURING ABERRATIONS USING A COHERENT COMPUTATIONAL METHOD BASED ON RANDOM PHASE MASKS

Presents the result of experiments on optimization of aberrations of an optical system using a coherent computational method based on random phase masks. The phase modulation parameters affecting the speed and efficiency of the iterative algorithm for phase imaging were studied.

Задача измерения и компенсации аберраций волнового фронта оптического излучения является актуальной для многих разделов физики, начиная с лазерная физики и астрономии, заканчивая биологией и медициной [1 - 5]. Используемые для этих целей современные датчики, основанные на принципах геометрической оптики – датчики Шака-Гартмана – обладают невысоким пространственным разрешением, а интерференционные методы чувствительны к вибрациям микрометрового масштаба.

Целью работы является экспериментальное исследование одного из наиболее перспективных вычислительных методов на основе случайных фазовых масок, базирующегося на методе WISH [6]. На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки. Мы использовали неодимовый лазер ($\lambda = 532$ нм), расширитель пучка на основе микрообъектива Л1 и объектива Л2, регулируемую диафрагму, жидкокристаллический ПВМС, на который выводились фазовые маски, КМОП-камеру.

Обработка записанных картин дифракции на фазовых масках (рис. 2) осуществлялась с помощью модифицированного алгоритма Герчберга–Сэкстона с ограничением в плоскости регистрации. Алгоритм состоял из трёх шагов: интегрального оптического преобразования для оценки объекта, замены модуля результирующего вычисленного оптического преобразования на измеренный модуль требуемого значения, обратного оптического преобразования для оценки состояния объекта.

Исследовались такие параметры системы, как пространственная частота и расстояние между ПВМС и камерой.

Для масок с низкой пространственной частотой скорость сходимости алгоритма увеличивается с увеличением расстояния между модулятором и камерой; аналогично, для масок с меньшим размером пикселя скорость сходимости алгоритма увеличивается при уменьшении расстояния между модулятором и камерой. Установлено, что при дифракции на фазовых масках с высокой пространственной частотой возникают ограничения, связанные с дифракционной расходимостью пучка, что приводит к стагнации алгоритма фазовой визуализации. Для масок с высокой пространственной частотой уровень ошибки, связанной с конечными размерами матрицы камеры, можно уменьшить уменьшив апертуру ограничивающей диафрагмы. Для масок с низкой пространственной частотой возможна обратная ситуация – увеличение диаметра пучка, в результате чего уровень ошибки увеличивается.

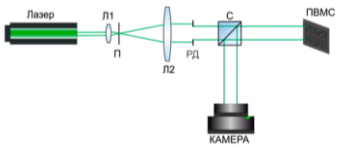


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

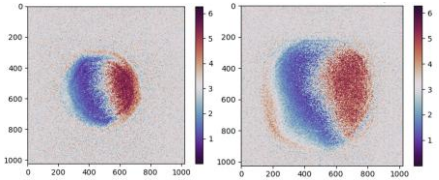


Рис. 2. Измеренные фазовые профили пучков

Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на 2023 - 2025 годы (задание FSWU-2023-0070).

Список литературы

1. Abdelsalam D.G., Shaalan M.S., et al. // Opt. Laser Eng. 2010. V. 48. P. 643-649.
2. Memmolo P., Miccio L., et al. // Cytometry Part A. 2014. V. 85. P. 1030-1036
3. Edrei E., Scarcelli G., // Sci. Rep. 2016. V. 6. P. 33558
4. Rivenson Y., Liu T., et al. // Light Sci. Appl. 2019. V. 8. P. 11-23
5. Matsui F., Yasuda K., et al. // Jpn. J. Appl. Phys. 2019. V. 58. P. 110602.
6. Wu Y., Sharma M., Veeraraghavan A. // Light: Science & Applications. 2019. V. 8. P. 44.

УДК 535(06)+004(06)

Н.О. ПРОХОРЕНКОВ, М.А. ВОЛЫНСКИЙ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНАЯ ЦИФРОВАЯ ГОЛОГРАФИЯ НА БАЗЕ ЛАЗЕРА С ПЕРЕСТРАИВАЕМОЙ ДЛИНОЙ ВОЛНЫ

В работе рассмотрены основные схемы формирования гиперспектрального куба. Предложена схема регистрации гиперспектральных цифровых голограмм. Рассчитаны параметры её основных узлов.

N.O. PROKHORENKOV, M.A. VOLYNSKY
ITMO University, Saint-Petersburg

HYPERSPECTRAL DIGITAL HOLOGRAPHY WITH WAVELENGHT-SWEPT LASER

In this paper main methods of hyperspectral cube formation are reviewed. Optical layout of hyperspectral digital holograms is proposed. Parameters of the key nodes is calculated.

Гиперспектральная цифровая голография (ГЦГ) представляет собой комбинацию двух методов: гиперспектральной съёмки и цифровой голографии. Симбиоз этих двух техник позволяет получать не только информацию о комплексном поле объектной волны, дифрагировавшей на объекте, но и о его спектральном составе [1]. Подобные возможности могут быть полезны в таких областях, как агро- и пищепромышленность, медицина, микроскопия и биология [1 - 3].

В методе ГЦГ информация записывается в гиперспектральный куб, два измерения которого соответствуют пространственным координатам, а третья – спектральной. В настоящее время существует четыре наиболее распространённые схемы получения гиперспектрального куба: пространственное сканирование, спектральное сканирование, «снапшот» и пространственно-спектральное сканирование [2]. Первые два основаны на последовательном сканировании объекта по пространственным и спектральной координатам куба, соответственно. Пространственно-спектральное сканирование является комбинацией предыдущих двух методов и обладает высоким пространственно-спектральным разрешением. Последний метод, «снапшот», позволяет сформировать куб за один раз и, как правило, реализуется при помощи гиперспектральных камер. Из всех методов наиболее широкодоступными являются методы

пространственного и спектрального сканирования, поскольку не требуют сложной и дорогостоящей аппаратуры. Однако они предъявляют высокие требования к условиям проведения эксперимента: температура воздуха, воздушные потоки, вибрации. Целью данной работы являлась разработка схемы установки для ГЦГ и расчёт параметров её основных узлов.

Нами предложена схема для записи внеосевых гиперспектральных цифровых голограмм при помощи лазера с перестраиваемой длиной волной волны на базе интерферометра Маха–Цендера (рис. 1). Согласно расчётам, для рабочего спектрального диапазона лазера (TSL 510, Santeck) в 1.26 - 1.36 мкм и матрицы (XEVA–1.7–640, Xenics) с размером пикселя 20 мкм, максимальный угол между опорной и объектной волнами составит 1.8 °, а минимальное расстояние записи – 53.6 см.

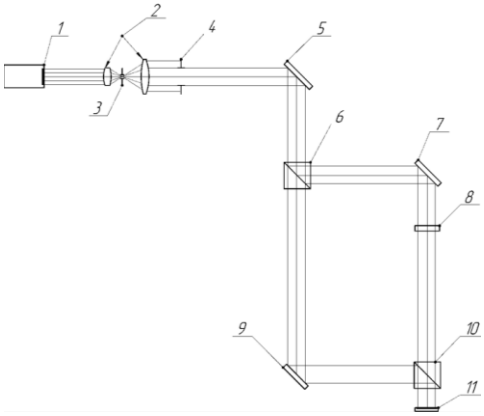


Рис. 1. Эскиз экспериментальной установки: 1 – лазер, 2 – телескопическая система, 3 – фильтр пространственных частот, 4 – диафрагма, 5, 7, 9 – плоские зеркала, 6, 10 – светоделители 8 – исследуемый объект, 11 – приёмник излучения

Список литературы

1. Каленков Г.С., Каленков С.Г., Штанько А.Е. Гиперспектральная голографическая фурье-микроскопия // Квантовая электроника. 2015. Т. 45. С. 333-338.

2. Каленков Г.С., Каленков С.Г. Цифровая гиперспектральная голография // Автометрия. 2020. Т. 56. № 2. С. 62-68.

3. Hillmann D., Lührs C., Bonin T., et al. Holoscopy – holographic optical coherence tomography // Optics Letters. 2011. V. 36. No. 13. P. 2390-2392.

4. Datum Geospatial. https://www.nict.go.jp/en/press/2020/07/22-1.html.

УДК 535(06)+004(06)

Д.А. РЫМОВ, П.А. ЧЕРЁМХИН, А.В. ШИФРИНА, Р.С. СТАРИКОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

НЕЙРОСЕТЕВОЙ СИНТЕЗ ГОЛОГРАММ 3D-СЦЕН С УЧЁТОМ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Реализован нейросетевой метод синтеза голограмм 3D-сцен, учитывающий, в процессе обучения параметры оптической системы, что позволяет интегрировать численную модель расчёта дифракции в процесс обучения нейронной сети. Проведена оценка скорости синтеза голограмм и качества восстановленных сцен, полученных с использованием обученной нейросети по сравнению с алгоритмом Герчберга–Сэкстона.

D.A. RYMOV, P.A. CHEREMKHIN, A.V. SHIFRINA, R.S. STARIKOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

NEURAL NETWORK TRAINING FOR 3D-HOLOGRAM GENERATION BASED OF THE PARAMETERS OF THE OPTICAL SETUP

A neural-network-based method for 3D-hologram generation, that uses the parameters of the optical setup for training was developed. This allows for the integration of the numerical diffraction model into the network training process. Hologram quality and generation speed of the trained model were compared against the Gerchberg–Saxton algorithm.

Методы синтеза компьютерных голограмм, основанные на использовании нейронных сетей, являются активно развивающейся областью [1]. На данный момент существует множество нейросетевых методов синтеза голограмм [2 - 3]. Однако они часто не учитывают в процессе обучения такие параметры оптической системы, как: длина волны излучения, расстояние от плоскости голограммы до плоскости восстановления, размер пикселя пространственно-временного модулятора света. В результате чего обученная модель способна синтезировать голограммы только в соответствии с параметрами голограмм, использованных в процессе обучения.

Предложенный метод позволяет использовать обученную нейронную сеть для синтеза голограмм 3D-сцен с параметрами отличными от тех, которые использовались для её обучения.

Демонстрации работы обученной нейронной сети была проведена на голограммах 3D-сцен, содержащих до 16 объектных плоскостей разрешением 1024 × 1024 пикселей. На рис. 1 представлена зависимость скорости синтеза голограмм в зависимости от количества объектных плоскостей для обученной модели и алгоритма Герчберга–Сэкстона (ГС).

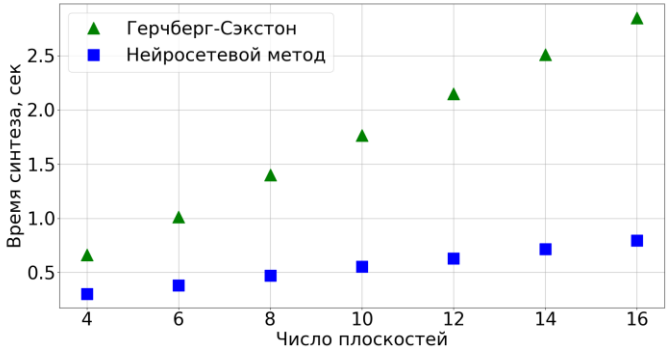


Рис. 1. Зависимость времени синтеза голограмм нейронной сетью и алгоритмом Герчберга–Сэкстона от числа плоскостей 3D-сцены

Как видно, нейросетевой метод обладает заметным преимуществом по быстродействию по сравнению с методом ГС. Это преимущество растёт при увеличении количества плоскостей в 3D-сцене, и достигает 3 раз при количестве плоскостей равном 16. Качество изображений при этом остается на том же уровне или лучше по сравнению с алгоритмом ГС (коэффициент корреляции 0,922 ± 0,013 для нейросети и 0,911 ± 0,012 для алгоритма ГС).

Полученные результаты демонстрируют возможность использования нейронных сетей для создания модели синтеза голограмм 3D-сцен, способную оперативно создавать качественные голограммы с возможностью динамического изменения параметров сцены.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 22-79-10340.

Список литературы

1. Нейросетевые методы в цифровой и компьютерной голографии. Обзор // Оптический журнал. 2024.

2. Zhong C., et al. Real-time High-quality computer-generated hologram using complex-valued convolutional neural network // IEEE Trans. Vis. Comput. Graph. 2023. P. 1-11.

3. Rymov D.A., et al. 3D-CGH-Net: Customizable 3D-hologram generation via deep learning // Opt. Lasers Eng. 2025. V. 184. P. 108645.

А.В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ[1], С.М. ДЗЯДУХ[1], Д.И. ГОРН[1],
С.А. ДВОРЕЦКИЙ[1,2], Н.Н. МИХАЙЛОВ[1,2], Г.Ю. СИДОРОВ[2],
М.В. ЯКУШЕВ[2]

[1]*Национальный исследовательский Томский государственный университет*
[2]*Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск*

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ nB(SL)n - СТРУКТУР НА ОСНОВЕ HgCdTe ДЛЯ LWIR ДИАПАЗОНА

В работе приводятся первые результаты исследований nBn структур LWIR диапазона со сверхрешёткой в барьерной области на основе $Hg_{1-X}Cd_XTe$ с составом X = 0.22 в поглощающем и контактном слоях. Исследовались МДП-структуры методом полной комплексной проводимости в широком диапазоне температур. Получена температурная зависимость произведения дифференциального сопротивления ОПЗ на площадь структуры $R_D \cdot A$ из экспериментальных данных полной проводимости на частоте 1 МГц.

A.V. VOITSEKHOVSKII[1], S.M. DZYADUKH[1], D.I. GORN[1],
S.A. DVORETSKY[1,2], N.N. MIKHAILOV[1,2], G.Yu. SIDOROV[2],
M.V. YAKUSHEV[2]

[1]*National Research Tomsk State University*
[2]*Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of Siserian Branch of the RAS, Novosibirsk*

ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF nB(SL)n STRUCTURES BASED ON HgCdTe FOR THE LWIR RANGE

The paper presents the first results of studies of LWIR range nBn structures with a superlattice in the barrier region based on $Hg_{1-X}Cd_XTe$ with a composition X = 0.22 in the absorbing and contact layers. MIS structures were studied by the method of total complex conductivity in a wide temperature range. The temperature dependence of the product of the differential resistance of the SCR by the structure area $R_D A$ was obtained from the experimental data of total conductivity at a frequency of 1 MHz.

Униполярные структуры nB(SL)n на основе HgCdTe обладают большим потенциалом для детектирования излучения в среднем и дальнем инфракрасном диапазоне в отсутствии глубокого охлаждения детектора. На данный момент ведутся активные исследования подобных структур, предназначенных для работы в диапазоне MWIR, а в литературе имеется целый ряд публикаций указывающий на определенные

полученные успехи в данной области [1 - 4]. Однако публикаций с исследованиями по практическому созданию структур, предназначенных для работы в диапазоне LWIR на основе nB(SL)n HgCdTe нет. Данное исследование ставит перед собой цель заполнить данный пробел.

В работе приводятся первые результаты исследований nBn структур со сверхрешёткой в барьерной области на основе $Hg_{1-X}Cd_XTe$ с составом X = 0.22 в поглощающем и контактном слоях. Сверхрешётка содержит в себе 15 ям шириной 12 нм, разделенных барьерами шириной 8 нм. На основе эпитаксиальных плёнок выращенных в ИФП СО РАН (Новосибирск), по технологии «меза» были созданы МДП-структуры MI-nB(SL)n, которые впоследствии исследовались методом полной комплексной проводимости в широком диапазоне температур. Защитный пассивирующий слой Al_2O_3, который покрывает всю поверхность структуры является также и функциональным диэлектриком, на поверхность которого в качестве полевого электрода напылён слой In.

Проведённые исследования показали наличие качественной границы раздела. Минимальный гистерезис ВФХ при измерении прямой и обратной разверток указывает на низкую плотность медленных поверхностных состояний, а близкое к нулю напряжение плоских зон на отсутствие какой либо существенной фиксированного заряда в диэлектрике. Из экспериментальных данных полной проводимости на частоте 1 МГц получена температурная зависимость $R_D{\cdot}A$. Максимальное значение $R_D{\cdot}A$ принимает при температуре около 120 К и составляет величину примерно 6.5 Ом·см^2, что хорошо согласуется с данными представленными в литературе для МДП-структур на основе $Hg_{1-X}Cd_XTe$ (x = 0.22 - 0.23). Температурная зависимость продольного сопротивления объёма в диапазоне 210 - 290 К хорошо спрямляется в координатах $Ln(1/R_S)$ от $q/(kB{\cdot}T)$. Из наклона данной зависимости получено значение энергии активации носителей заряда при условии их межзонной генерации равное 72 мэВ, что более чем в два раза меньше ширины запрещённой зоны для КРТ с составом x = 0.22 в данном диапазоне температур. Вопрос о механизме генерации носителей остается дискуссионным.

Исследование выполнено за счёт средств гранта Российского научного фонда № 23-62-10021.

Список литературы

1. Voitsekhovskii A.V., et al. // J. Comm. Technol. Electron. 2023. V. 68.
2. Войцеховский А.В. и др. // Прикладная физика. 2023. Т. 4.
3. Войцеховский А.В. и др. // Прикладная физика. 2023. Т. 5.
4. Войцеховский А.В. и др. // Оптический журнал. 2024. Т. 91.

УДК 535(06)+004(06)

Е.Ю. БАРУЛИНА[1,2], Э.О. ЧИГЛИНЦЕВ[1,2], К.В. ШЕВЯКОВА[1,2], А.Н. АБРАМОВ[3], В.А. КРАВЦОВ[3], А.И. ЧЕРНОВ[1,2]
[1]Российский квантовый центр, Сколково
[2]Московский физико-технически институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный
[3]Университет ИТМО

ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ МУАРОВЫХ СВЕРХРЕШЁТОК НА ОСНОВЕ СЛОЁВ ДИХАЛЬКОГЕНИДОВ ВОЛЬФРАМА

Изготовлены и исследованы оптическим методом гетероструктуры на основе скрученных дихалькогенидов вольфрама со структурой Графит/hBN/WSe_2/WS_2/Графит/hBN/Графит/Au. Произведено пространственное картирование сигнала фотолюминесценции гетероструктуры и детектирование сигнала фотолюминесценции межслоевого экситона при нулевом напряжении на затворах.

E.Yu. BARULINA[1,2], E.O. CHIGLINTSEV[1,2], K.V. SHEVYAKOVA[1,2], A.N. ABRAMOV[3], V.A. KRAVTSOV[3], A.I. CHERNOV[1,2]
[1]Russian Quantum Center, Skolkovo
[2]Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny
[3]ITMO University

FABRICATION AND INVESTIGATION OF MOIRÈ SUPERLATTICES BASED ON TUNGSTEN DICHALCOGENIDES LAYERS

The devices based on the twisted tungsten dichalcogenides with structure Graphite/hBN/WSe_2/WS_2/Graphite/hBN/Graphite/Au were fabricated and investigated by optical method. Photoluminescence spatial mapping of the heterostructure and detection of interlayer exciton photoluminescence signal at zero gate voltage were performed

Муаровые гетероструктуры Ван-дер-Ваальсовых материалов могут представлять собой платформу для изучения коррелированных состояний и являются альтернативным методом для изучения квантовомеханических моделей [1, 2]. Муаровые сверхрешётки основаны на создании периодического мотива, возникающего при наложении двух монослоёв материалов, повернутых под углом, друг относительно друга [3]. Бислой

из дихалькогенидов вольфрама, в частности WSe_2 и WS_2, имеющий треугольную кристаллическую решётку и описываемый моделью Хаббарда, показал существенную электронную корреляцию в структуре Графит/hBN/WSe_2/WS_2/Графит/hBN/Графит/Au, благодаря сильному кулоновскому взаимодействию (рис. 1). Помимо этого, гетероструктуры были исследованы оптическими методами и было проведено пространственное картирование распределения фотолюминесценции с обнаружением сигнала от межслойных экситонов при нулевом напряжении на затворах. Исследование проводилось при температуре около 8 К в гелиевом криостате. Для оптической накачки образца использовалось непрерывное лазерное излучение с длиной волны 633 нм. Дальнейшие исследования сильно коррелированных состояний откроют новые возможности для создания квантовых симуляторов.

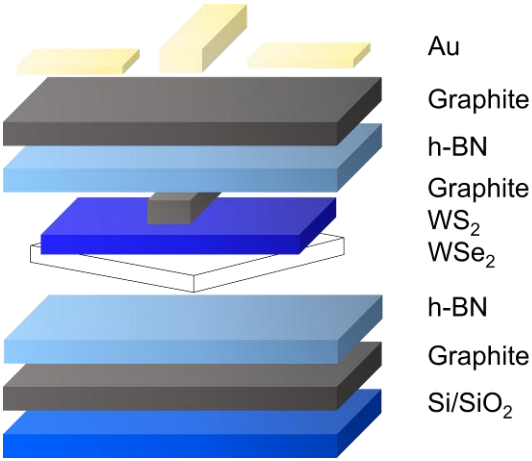


Рис. 1. Модель гетероструктуры на основе слоёв дихалькогенидов вольфрама со структурой Графит/hBN/WSe2/WS2/Графит/hBN/Графит/Au

Список литературы

1. Kennes D.M., Claassen M., Xian L. et al. // Nat. Phys. 2021. V. 17 (2). P. 155.
2. Tang Y., Li L., Li T., Xu Y., Liu S., et al. // Nature. 2020. V. 579 (7799). P. 353.
3. He F., Zhou Y., Ye Z., et al. // ACS nano. 2021. V. 15 (4). P. 5944.

УДК 535(06)+004(06)

А.К. МАРТЬЯНОВ[1], И.А. ТЯЖЕЛОВ[1,2], В.Г. РАЛЬЧЕНКО[1], В.С. СЕДОВ[1]
[1]Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва
[2]Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва

ЦЕНТРЫ ОКРАСКИ В МИКРОКРИСТАЛЛАХ CVD-АЛМАЗА, ЛЕГИРОВАННЫХ ОЛОВОМ

В данной работе впервые представлена возможность синтеза методом химического осаждения из газовой фазы (англ. CVD) огранённых микрокристаллов алмаза, легированных оловом, с субмикронными частицами SnO_2 в качестве твердотельного источника примеси. С помощью фотолюминесцентной спектроскопии, при комнатной и низкой температурах (7 К) получен сигнал на длине волны 621 нм, характерный для нового центра окраски «Олово-вакансия» (Sn - V) в алмазе.

A.K. MARTYANOV[1], I.A. TIAZHELOV[1,2], V.G. RALCHENKO[1], V.S. SEDOV[1]
[1]Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow
[2]National Research University Higher School of Economics, Moscow

COLOUR CENTERS IN TIN-DOPED CVD DIAMOND MICROCRYSTALS

This work presents for the first time the possibility of synthesizing by chemical vapor deposition (CVD) well-faceted tin-doped diamond microcrystals with submicron SnO_2 particles as a solid-state impurity source. Using photoluminescence spectroscopy, at room and low temperatures (7 K) a signal at a wavelength of 621 nm was obtained, typical for a new “Tin-Vacancy” (Sn - V) color center in diamond.

Центры окраски IV группы в алмазе, такие как кремний-вакансия (Si - V), германий-вакансия (Ge - V) и олово-вакансия (Sn - V), привлекают внимание из-за их узкополосной фотолюминесценции (в видимом и ближнем ИК-диапазонах) при комнатной температуре [1]. Данные центры окраски перспективны для применения в квантово-информационных технологиях, биомедицине и оптической термометрии. Среди них Sn - V выделяется благодаря большому атомному радиусу олова, что приводит к большему расщеплению основного состояния. Такая структура обеспечивает длительное время спиновой когерентности (в пределах

нескольких миллисекунд) при температурах около 2 K, что выгодно отличает его от Si - V и Ge - V центров, требующих субкельвиновых температур [2].

Внедрение крупных атомов Sn в плотную решётку алмаза задача нетривиальная, её сопровождает ряд препятствий: 1) связь Sn - C, гораздо слабее связи C - C, что тормозит процесс легирования алмаза; 2) отсутствие надежного источника примеси (газообразный SnH_4 недостаточно стабилен, а кристаллическое олово имеет слишком низкую температуру плавления). В данной работе на подложках нитрида алюминия (AlN) были сформированы, методом газофазного осаждения (англ. CVD), микрокристаллы алмаза, легированные оловом (рис. 1), с размером в несколько микрометров, которые продемонстрировали узкополосную фотолюминесценцию (ФЛ) с бесфононной линией (БФЛ) для центра Sn - V вблизи 621 нм (рис. 2). Также при комнатной и низкой температурах, обнаружен существенный (более 5 нм) сдвиг положения БФЛ центра Sn - V от кристалла к кристаллу из-за вариации внутренних напряжений в них, обусловленных дефектами.

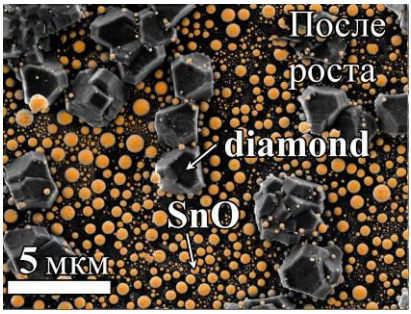


Рис. 1. РЭМ-изображение выращенных алмазных микрочастиц на подложках AlN

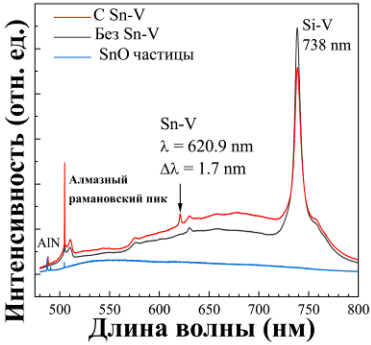


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции при комнатной температуре выращенных: алмазных микрокристаллов с центрами Sn - V (красная кривая); алмазных микрокристаллов без центров Sn - V (чёрная кривая) и частиц SnO (синяя кривая)

Список литературы

1. Sedov V.S., Martyanov A.K., et al. // Diamond and Related Materials. 2023. V. 138. P. 110206.

2. Iwasaki T. // Semiconductors and semimetals. 2020. V. 103. P. 237-256.

УДК 535(06)+004(06)

Д.Н. БУХАРОВ
Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГЛОЩАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ МОДЕЛЕЙ ГРАФИТИЗАЦИИ ИСКУССТВЕННОГО АЛМАЗА

Приведена имитационная модель поглощательной способности искусственного алмаза с учётом особенностей смоделированной структуры – пространственного распределения дефектов/графитизированных областей на двумерной расчётной области. Предложенная модель может быть использована в задачах моделирования лазерно-индуцированных графитизированных областей.

D.N. BUKHAROV
Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs

MODELING ABSORPTIVITY FOR IMPLEMENTATION OF ARTIFICIAL DIAMOND GRAPHITIZATION MODELS

An imitation model of the absorption capacity of artificial diamond is presented, taking into account the features of the modeled structure – the spatial distribution of defects/graphitized areas in a two-dimensional computational domain. The proposed model can be used in problems of modeling laser-induced graphitized regions.

На сегодняшний день материалы из искусственного алмаза предоставляют отличные возможности использования в качестве новой элементной базы для сенсоров и датчиков, позволяющих детектировать широкий спектр объектов – от регистрации излучения до мониторинга состояния внешней среды [1].

Для создания таких датчиков важно уметь синтезировать проводящие структуры в искусственном алмазе. Одним из удобных методов такого синтеза является управляемая лазерная графитизация [2]. Этот метод позволяет получать качественные структуры с развитой поверхностью. Исследования областей графитизации продемонстрировали влияние тепловых факторов на итоговые структуры. Для описания структурных особенностей таких образцов могут применяться феноменологические диффузионные модели в рамках фрактального приближения, реализованные с использованием техники клеточного автомата [3]. Суть таких моделей – итерационное расширение графитизированной области по ячейкам расчётной области с заданной вероятностью. Чтобы оценить

эту вероятность необходимо задать температуру текущей ячейки. Одним из определяющих температуру факторов в результате лазерного воздействия является поглощательная способность материала. В связи с тем, что структура искусственного алмаза может содержать множество дефектов, а также уже графитизированных ранее областей, необходимо проводить моделирование поглощательной способности. В первом приближении такую модель можно задать как распределение графитизированных (дефектов) и неграфитизрованных областей на моделируемой расчётной области, со своими коэффициентами поглощения. Основной параметр такой модели – концентрация дефектов. На рис. 1 приведены модели областей с дефектами (светлые области) со случайным распределением (рис. 1а) и фрактальным – по модели DLA [4] (рис. 1б). Таким образом, задав значения коэффициента поглощения, характерные для графита (светлые области на рис. 1) как 0.04 $см^{-1}$ [5], и для алмаза (тёмные области на рис. 1) как 0.01 $см^{-1}$ [6], получим модель пространственного распределения коэффициента поглощения.

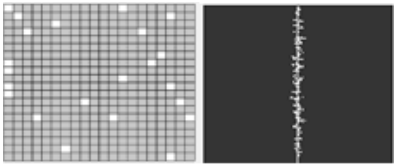


Рис. 1. Модель пространственного распределения коэффициента поглощения алмаза с дефектами: концентрация дефектов 10 % (а), 25 % (б)

Более, задав соотношения коэффициентов поглощения в зависимости от длины излучения [7], можно организовать связь модели со схемой синтеза. Таким, образом, предложенная модель может быть использована для определения температуры в диффузионных моделях для задач моделирования лазерно-индуцированных графитизированных областей.

Исследование выполнено в рамках научного проекта FZUN-2024-0018.

Список литературы

1. Shamrakov A., et al. // Nanoindustry. 2010. V. 1 (3). P. 26-28.
2. Ashikkalieva K.K., et al. // Diamond and Related Materials. 2022. V. 128. P. 1-7.
3. Evseev A.A., et al. // PDM. 2009. V. 1(4). P. 72-83 .
4. Mroczka J., et al. // Metrol. Meas. Syst. 2012. V. XIX(3). P. 459-470.
5. Smausz T., et al. // Applied Physics A. 2017. V. 123.
6. Luk'yanov A.Yu., et al. // Quantum Electronics. 2008. V. 38 (12). P. 1171-1178.
7. Thomas M.E., et al. // fohns Hopkins APL Technical Digest. 1993. V. 14 (1). P. 16-23.

УДК 535(06)+004(06)

В.В. ДИРКО, Н.В. ПЛОТНИКОВ
Национальный исследовательский Томский государственный университет

ЭПИТАКСИАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ КРЕМНИЯ И ГЕРМАНИЯ НА ГРАФИТЕ

В работе рассматривается эпитаксиальный рост кремния и германия на подложке высокоориентированного пиролитического графита (ВОПГ) непосредственно в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии. Анализ осаждения материалов на поверхность ВОПГ осуществлялся методом дифракции быстрых отражённых электронов (ДБОЭ). Кроме того, полученные образцы исследовались методами Рамановской спектроскопии и сканирующей электронной микроскопии. Рассмотрен широкий диапазон температур осаждения от 100 до 800 °С и определены температурные интервалы для различных режимов осаждения кремния и германия на ВОПГ.

V.V. DIRKO, N.V. PLOTNIKOV
National Research Tomsk State University

EPITAXIAL SYNTHESIS OF SILICON AND GERMANIUM ON GRAPHITE

The paper considers the epitaxial growth of silicon and germanium on a highly oriented pyrolytic graphite (HOPG) substrate directly in the process of molecular beam epitaxy. Analysis of the deposition of materials on the HOPG surface was carried out by the Reflection high-energy electron diffraction (RHEED) method. In addition, the obtained samples were studied by Raman spectroscopy and scanning electron microscopy. A wide range of deposition temperatures from 100 to 800 °C was considered and temperature intervals for various modes of silicon and germanium deposition on HOPG were determined.

В отличие от объёмных материалов, двумерные кристаллы имеют высокое отношение площади поверхности к объёму, что влияет на их энергетическую структуру, а также электрические и оптические свойства. Двумерные кремний (силицен) и германий (германен) привлекают особое внимание исследователей. Важным преимуществом этих двух новых материалов является их прямая совместимость с существующей высокоразвитой кремниевой технологией [1, 2].

Преимущественно для создания графеноподобных материалов применяется их эпитаксиальное выращивание на согласованных по параметру решётки подложках [3, 4]. Подложки из ВОПГ и графена

являются перспективным материалом для получения силицена и германена. Однако, на сегодняшний день имеется слабое понимание о процессах, протекающих при эпитаксиальном осаждении кремния и германия на поверхности таких подложек.

Попытки получить силицен и германен на подложках ВОПГ предпринимаются с 2016 года [5, 6], но в работе [7] авторы подвергли сомнению возможность получения таких материалов и вопрос до сих пор остается открытым.

В данной работе рост кремния и германия изучался непосредственно в процессе их синтеза на поверхность ВОПГ методом ДБОЭ. Также, полученные образцы были исследованы методами сканирующей электронной микроскопии и Рамановской спектроскопии. Осаждение материалов осуществлялось в условиях сверхвысокого вакуума ($P = 1.1 \cdot 10^{-9}$торр) методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Анализ синтеза материалов проводился в диапазоне температур подложек 100 - 800 °C, выявлено влияние температуры на режимы роста кремния и германия на ВОПГ.

Показано, что при низких температурах, близких к комнатным, кремний и германий растут аморфно, а с повышением температуры на поверхности наблюдается образовании поликристаллических фаз. Установлено, что в диапазоне температур от 250 до 400 °C кремний и германий в течение первого атомного слоя повторяет структуру подложки ВОПГ, а затем на картине дифракции формируются дублирующиеся рефлексы 1/N ($N(Si) = 1{,}56$ и $N(Ge) = 1{,}62$), которые соответствуют постоянным решётки силицена и германена, что говорит о наличии областей графеноподобных двумерных фаз [8].

Полученные результаты возможно применить в разработках технологии синтеза силицена и германена на подложках ВОПГ. Кроме того, приведённые результаты справедливы и для эпитаксиального роста слоёв кремния и германия на графене.

Список литературы

1. Masson L. et al. // Nanoscale Adv. 2023. V. 5. P. 1574-1599.
2. Baig N. // Compos. Part A. 2023. V. 165. P. 107362.
3. Zhou D., et al. // Adv. Funct. Mater. 2020. V. 31. P. 2006997.
4. Grazianetti C., et al. Phys. Status Solidi RRL–Rapid Res. Lett. 2020. V. 14. P. 1900439.
5. Shimonaka M., et al. // Surface Science. 2014. V. 628. P. 82-85.
6. De Crescenzi M., et al. // ACS Nano. 2016. V. 10. P. 11163-11171.
7. Persichetti L., et al. // J. Phys. Chem. Lett. 2016. V. 7. P. 3246-3251.
8. Lozovoy K.A., et al. // C-Journal of Carbon Research. 2024. V. 10(2). P. 36.

УДК 535(06)+004(06)

О.И. КУКЕНОВ, К.А. МАЙЕР, А.А. БУРНАШОВ
Национальный исследовательский Томский государственный университет

КИНЕТИКА ФОРМИРОВАНИЯ СВЕРХСТРУКТУРЫ 2xN ПРИ ЭПИТАКСИАЛЬНОМ РОСТЕ Ge НА Si(100)

В работе представлены результаты анализа гетероэпитаксиального роста Ge на Si(100) методом дифракции быстрых отражённых электронов. Исследована динамика длины димерных рядов сверхструктуры 2xN в процессе роста для широкого диапазона температур 200 - 750 °C. Экспериментально установлены зависимости количества монослоёв Ge, необходимые для появления рефлекса 1/N, и количества монослоёв Ge до выхода параметра 1/N на максимальное значение от температуры, а также получены зависимости изменения N в процессе роста для разных температур синтеза.

O.I. KUKENOV, X.A. MAIER, A.A. BURNASHOV
National Research Tomsk State University

KINETICS OF 2xN SUPERSTRUCTURE FORMATION DURING EPITAXIAL GROWTH OF Ge ON Si(100)

The paper presents the results of the analysis of heteroepitaxial growth of Ge on Si(100) by the high-energy electron diffraction method are presented. The dynamics of the length of dimer rows of the 2xN superstructure during growth is studied for a wide temperature range of 200 - 750 °C. The dependences of the number of Ge monolayers required for the appearance of the 1/N reflection and the number of Ge monolayers before the 1/N parameter reaches its maximum value on temperature are experimentally established, and the dependences of N change during growth for different synthesis temperatures are obtained.

Элементы на основе наноструктур Ge и Si обладают улучшенными свойствами по сравнению с микроэлектронными компонентами [1]. Кроме того, за счёт развитой кремниевой технологии, такие структуры легко интегрировать в имеющуюся элементную базу современной оптоэлектроники. С развитием науки и техники, выдвигаются всё более жёсткие требования к параметрам и качеству наноструктур. Форма и свойства наноразмерных структур зависят от условий и параметров роста. Ростовые процессы с самого начала синтеза влияют на такие параметры Ge-Si наноструктур как плотность квантовых точек или нитей и их геометрические особенности, резкость гетерограницы, а также критическую толщину смачивающего слоя [2].

Целью работы является экспериментальное исследование сверхструктуры 2xN на начальной стадии гетероэпитаксиального роста Ge на Si(100) для температур 200 - 750 °C.

Эксперименты проводились на установке молекулярно-лучевой эпитаксии «Катунь-100». В процессе роста морфология поверхности анализировалась методом дифракции быстрых отражённых электронов. Скорость роста Ge была одинаковой для всех экспериментов и составляла 0,02 МС/с. На картинах дифракции при напылении Ge на Si(100) возникают рефлексы 1/N, которые соответствуют сверхструктуре 2xN [3, 4].

Анализ картин дифракции при гетероэпитаксиальном росте Ge на Si(100) показал, что при увеличении температуры требуется меньшее количество монослоёв германия до возникновения рефлексов 1/N. А также, определено, что обратная величина длины димерного ряда выходит на своё максимальное значение при меньшем количестве напылённого германия с увеличением температуры. В работе показана динамика изменений параметра 1/N от времени для температур 200 - 750 °C. Полученные зависимости объясняются следующим. При повышении температуры синтеза, адатомы обладая большей энергией встраиваются в более выгодные места, тем самым повышая эффективность снятия упругих напряжений в системе. Фундаментальные исследования дополняют теорию о физике процессов эпитаксиального роста, а также способствуют развитию технологии создания элементов фотоники и электроники на основе германий-кремниевых наноструктур.

Список литературы

1. Izhnin I., et al. // Opto-Electronics Review. 2018. V. 26. P. 195-200.
2. Voigtlander B. // Surf. Sci. Rep. 2001. V. 43. P. 127-254.
3. Dirko V.V., et al. // Nanotechnology. 2022. V. 33. P. 115603.
4. Taniguchi T., et al. // ACS Applied Materials & Interfaces. 2020. V. 12 (22). P. 25428-25434

УДК 535(06)+004(06)

С.П. ИЛЬИН[1], Л.Е. ЗЕЛЕНКОВ[1,2]
[1]*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*
[2]*Харбинский инженерный университет, Циндао, Китай*

СИНТЕЗ ОПТИЧЕСКИ РЕЗОНАНСНЫХ МИКРОКРИСТАЛЛОВ ГЕРМАНИЕВЫХ ПЕРОВСКИТОВ ДЛЯ АП-КОНВЕРСИИ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В работе приведены результаты экспериментальной разработки технологи синтеза микронных и субмикронных кристаллов перовскита $CsGeI_3$ методом центрифугирования. Проведены исследования линейных и нелинейных оптических свойств полученных образцов. По итогам полученных результатов, сформированные микрокристаллы $CsGeI_3$ были описаны как материалы для задач ап-конверсионной нелинейной нанофотоники.

S.P. ILIN[1], L.E. ZELENKOV[1,2]
[1]*ITMO University, Saint-Petersburg*
[2]*Harbin Engineering University, Qingdao, China*

SYNTHESIS OF OPTICALLY RESONANT MICROCRYSTALS OF GERMANIUM PEROVSKITES FOR UP-CONVERSION OF INFRARED LIGHT

The work presents the results of experimental development of the synthesis technology for micron and submicron $CsGeI_3$ perovskite crystals by the spin-coating method. The linear and nonlinear optical properties of the obtained samples were studied. Based on the results obtained, formed $CsGeI_3$ microcrystals were described as materials for up-conversion nonlinear nanophotonics applications.

Галогенидные перовскиты являются перспективными материалами, привлекающими большое внимание исследователей благодаря своим выдающимся оптоэлектронным свойствам. Отдельно среди них можно выделить бессвинцовые германиевые галогенидные перовскиты, представляющие класс экологически чистых материалов, имеющих большой потенциал для применения в нелинейной оптике за счёт высоких коэффициентов квадратичной нелинейной восприимчивости ($\chi^{(2)}$ = 125 пм/В) и двухфотонного поглощения (β = 18.4 см/ГВт) [1, 2]. Кроме того, был продемонстрирован потенциал наноструктурирования германиевых перовскитов $CsGeI_3$ для резонансного усиления оптических сигналов [3]. Цель данной работы – разработка простой и

воспроизводимой методики формирования микрокристаллов $CsGeI_3$, а также изучение резонансного усиления их нелинейного отклика.

Синтез микрокристаллов $CsGeI_3$ проводился методом одностадийного центрифугирования из исходного раствора перовскита в ДМФА. В ходе оптимизации параметров синтеза были подобраны оптимальные параметры, подходящие для формирования микрокристаллов (рис. 1).

Дальнейшее экспериментальное изучение оптических свойств проводилось при возбуждении образцов лазерным диодом (532 нм) и фемтосекундным лазером (длительность импульса 220 фс, частота 10 кГц). Микрокристаллы $CsGeI_3$ продемонстрировали как сигнал второй гармоники (ВГ), так и двухфотонную фотолюминесценцию (рис. 2) в ближнем ИК-диапазоне. Кроме того, во время измерений при температуре 7 К, при накачке фемтосекундным лазером на длине волны 1420 нм, микрокристаллы перовскита демонстрировали мультимодовую лазерную генерацию (~ 770 нм) с порогом генерации F_{th} = 19.3 мДж/см^2, что демонстрирует их потенциал для эффективной конверсии ИК-излучения.

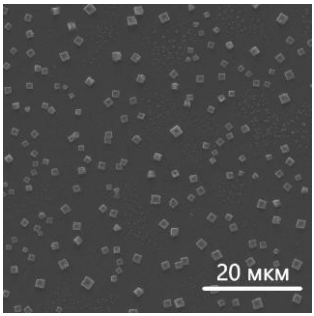


Рис. 1. СЭМ-изображение полученных кристаллов $CsGeI_3$

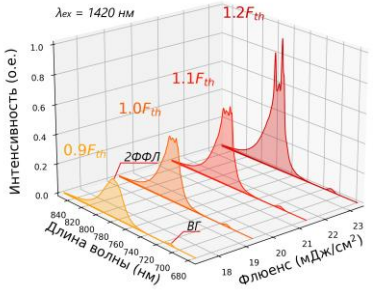


Рис. 2. Зависимость спектра двухфотонной фотолюминесценции от мощности вблизи порога лазерной генерации

Настоящая работа предоставляет методику синтеза и экспериментальные данные, которые послужат основой для дальнейших исследований в области применения резонансных структур германиевых перовскитов для задач нелинейной фотоники.

Список литературы

1. Stoumpos C.C., Frazer L., et al. // JACS. 2015. V. 137. P. 6804.
2. Tang L.-C., Chang Y.-C., et al. // JJAP. 2009. V. 48. P. 112402.
3. Ilin S., Khmelevskaia D., et al. // Adv. Opt. Mat. 2024. V. 12 (22). P. 2400170.

А.А. БЕРЕЗОВСКАЯ, С.К. ЛЕБЕНКОВА, Л.Д. МИЛЬШИНА
Брянский государственный университет им. И.Г. Петровского

ИССЛЕДОВАНИЕ АП-КОНВЕРСИОННЫХ СВОЙСТВ ЩЁЛОЧНО-ЗЕМЕЛЬНЫХ ФТОРИДОВ MeF_2 - ErF_3 (ГДЕ Me = Ca, Sr) ПРИ ЛАЗЕРНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ 802 нм

В работе исследованы ап-конверсионные свойства в кристаллах щёлочно-земельных фторидов MeF_2 - ErF_3 (где Me = Ca, Sr) при комнатной температуре и температуре жидкого азота.

A.A. BEREZOVSKAYA, S.K. LEBENKOVA, L.D. MILSHINA
Bryansk State University named after I.G. Petrovsky

INVESTIGATION OF THE AP-CONVERSION PROPERTIES OF ALKALINE EARTH FLUORIDES MeF_2 - ErF_3 (WHERE ARE THE METALS – Ca, Sr) UNDER LASER EXCITATION OF 802 nm

The ap-conversion properties in crystals of alkaline earth fluorides MeF_2 - ErF_3 at room temperature and liquid nitrogen temperature have been studied.

Ионы эрбия используются в качестве лазерных активаторов с середины шестидесятых годов прошлого века [2] и зарекомендовали себя как один из наиболее эффективных типов примесных ионов для генерации лазерного излучения в ближнем и среднем инфракрасном диапазоне. Фториды щёлочно-земельных элементов (ЩЗЭ) обладают уникальными физическими свойствами, благодаря которым можно наблюдать явление ап-конверсии, это связано с их низкой энергией фотонов – SrF_2 (366 $см^{-1}$) и CaF_2 (456 $см^{-1}$). Такая физическая характеристика матрицы, как энергия фотонов, отвечает за степень рассеивания падающей энергии в виде теплового излучения и позволяет минимизировать безызлучательные процессы, за счёт которых теряется энергия [1].

Сравнивая значения относительных интенсивностей образцов на рис. 1, можно заметить, что интенсивность люминесценции, соответствующая красной области ($^4F_{9/2}$ - $^4I_{15/2}$) спектра выше у образца ErF_3/CaF_2 15/85 % примерно в четыре раза по сравнению с образцом ErF_3/CaF_2 85/15 %. Процесс ап-конверсии ускоряется с повышением

концентрации ионов Er^{3+} Однако интенсивность люминесценции в видимом диапазоне с увеличением степени легирования матрицы значительно уменьшается, так как безызлучательная релаксация с верхних уровней превышает скорость их заселения в результате ап-конверсии.

На рис. 2 заметно, что при охлаждении образца жидким азотом, интенсивность излучения возрастает в результате того, что тепловые колебания матрицы рассеивают энергию, получаемую акцептором, с понижением температуры частота колебаний уменьшается, что приводит к увеличению доли фотонов и возрастанию интенсивности излучения.

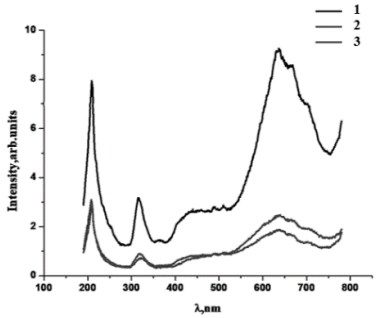


Рис. 1. Спектр люминесценции образцов 85 % ErF_3 х 15 % MeF_2(где Me = Ca, Sr) и 15 % ErF_3 х 85 % MeF_2 (где Me = Ca) при мощности лазера 1,44 Вт , где 1 – Er/Ca 15/85, 2 – Er/Ca 85/15, 3 – Er/Sr 85/15

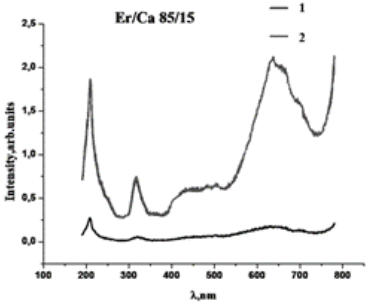


Рис. 2. Спектр люминесценции ErF_3/CaF_2 85/15 % при мощности лазера 1,44 Вт, при охлаждении образца жидким азотом, где 1 – образец при комнатной температуре, 2 – образец охлаждённый жидким азотом

В результате проведённых экспериментов при лазерном возбуждении с длиной волны 802 нм, наблюдается характерная для Er^{3+} полоса люминесценции, находящаяся в диапозоне 660 нм ($^4F_{9/2}$ - $^4I_{15/2}$), соответствующего красной области спектра. Выявлено наличие двух пиков люминесценции 325 и 210 нм, которые требуют дальнейшего исследования их природы.

Список литературы:

1. Овсянкин В.В., Феофилов П.П. О механизме суммирования электронных возбуждений в активированных кристаллах // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1966. Т. 3.

2. Snitzer E., Woodcock R. $Yb^{3+} - Er^{3+}$ glass laser // Applied Physics Letters 1965. No. 6.

УДК 535(06)+004(06)

М.Г. КУЧЕРЕНКО, В.М. НАЛБАНДЯН, А.П. РУСИНОВ
Оренбургский государственный университет

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ГЕНЕРАЦИЮ КОЛЛОИДНОГО РАСТВОРА РОДАМИНА 6Ж С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ НАНОЧАСТИЦАМИ

Приведены результаты экспериментального исследования понижения порога генерации водного раствора родамина 6Ж (Р6Ж) при добавлении металлических наночастиц (НЧ) в различном количестве. Разработана математическая модель влияния постоянного магнитного поля (МП) на порог генерации НЧ-обогащённого лазера на красителе.

M.G. KUCHERENKO, V.M. NALBANDYAN, A.P. RUSINOV
Orenburg State University

THE EFFECT OF A MAGNETIC FIELD ON THE GENERATION OF A COLLOIDAL SOLUTION OF RHODAMINE 6J WITH METAL NANOPARTICLES

The results of an experimental study of the decrease in the generation threshold of an aqueous solution of rhodamine 6G (R6G) with the addition of metal nanoparticles (NP) in different quantities are presented. A mathematical model of the influence of a constant magnetic field on the generation threshold of a NP-enriched dye laser is developed.

Использование металлических наночастиц (НЧ) для улучшения генерационных характеристик лазеров на красителях представляет несомненный научный и практический интерес и потому широко распространено [1 - 3]. В данной работе рассмотрено влияние НЧ серебра на порог генерации водного раствора Р6Ж. Коллоидный раствор НЧ был синтезирован методом Туркевича со средним размером НЧ – 56 нм. Оптическая накачка раствора красителя проводилась импульсами второй гармоники (λ = 532 нм) Nd:YAG-лазера LQ529B с длительностью 10 нс. Последующее излучение от раствора красителя анализировалось ПЗС-спектрометром BIM-6002A, синхронизированным с лазером накачки.

Энергия E лазера накачки изменялась в диапазоне от 4 до 36 мДж. Порог генерации определялся по наблюдаемым искажениям спектра излучения раствора красителя с НЧ и без них. Так, в отсутствие НЧ при E = 4 - 21 мДж спектры излучения повторяют спектр флуоресценции

водного раствора Р6Ж с максимумом на λ = 562 нм. По достижению E = 25 мДж и выше в спектре излучения появляется узкий пик на λ = 557 нм, отвечающий началу генерации (рис. 1, врезка).

С добавлением в раствор НЧ Ag порог генерации значительно уменьшается (рис. 1). Так, при объёмной доле $\nu_{нч}$ = 0,62 % коллоидных НЧ Ag в растворе, порог генерации составил E = 8 мДж. Дальнейшее увеличение $\nu_{нч}$ повышало порог генерации. Как показано на рис. 2, наличие НЧ в растворе с красителем понижает порог генерации с одновременным увеличением интенсивности свечения.

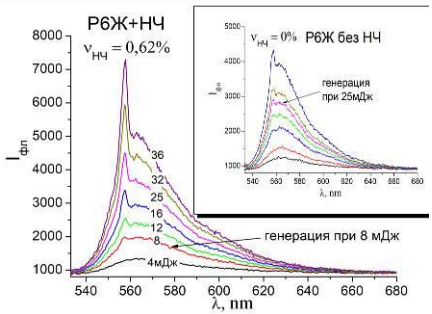


Рис. 1. Спектры излучения красителя при разных энергиях возбуждения

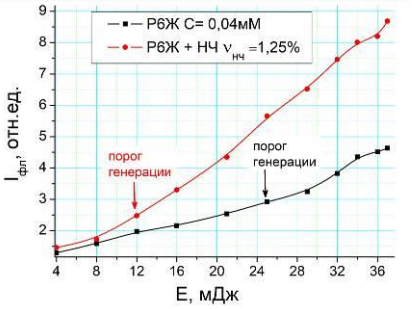


Рис. 2. Зависимость интенсивности излучения красителя от энергии возбуждения

В работе [4] показано, что плазмонными свойствами проводящих частиц можно управлять с помощью внешнего МП. Так, скорость w_{sp} спонтанного излучения бинарной системы «молекула – НЧ» изменяется в МП индукции **B**. Для порогового значения интенсивности I_{th} света накачки и инверсии $n_{th}^{(0)}$ получаем $I_{th} = \hbar\omega \dfrac{(n_0 + n_{th}^{(0)})}{(n_0 - n_{th}^{(0)})} \dfrac{\left[w_{sp}(\mathbf{r}\,|\,\mathbf{B}) + U(\mathbf{r}\,|\,\mathbf{B}) \right]}{\sigma(\mathbf{B})}$,

с характерной зависимостью скоростей w_{sp} и U – безызлучательного переноса энергии, а также сечения поглощения σ от индукции поля **B** [4]. Произведён синтез композитных НЧ серебра с ферромагнитным (Ni, Co, Fe) кором. Разрабатывается методика экспериментального обнаружения зависимости характеристик лазерной генерации от магнитного поля.

Список литературы

1. Зейниденов А.К., Ибраев Н.Х., Кучеренко М.Г. // Вестник ОГУ. 2014. № 9. С. 96-102.

2. Русинов А.П. и др.// Университетский. комплекс как регион. центр образования, науки и культуры // Материалы. Всерос. науч.-метод. конф. Оренбург: ОГУ, 2024. С. 3518-3525.

3. Донченко В.А. и др. // Известия ВУЗов. Физика. 2013. Т. 56 (8). С. 9-15.

4. Kucherenko M.G., Nalbandyan V.M. // Opt. and Spect. 2020, V. 128 (11). P. 1910-1917.

УДК 535(06)+004(06)

В.Р. ГРЕСЬКО, А.Д. ДОЛГОПОЛОВ, М.М. СЕРГЕЕВ
Университет ИТМО, Санки-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО ДИХРОИЗМА В ПЛЁНКАХ ОКСИДА ЦИНКА С НАНОЧАСТИЦАМИ СЕРЕБРА

Приведены результаты исследований по влиянию параметров фемтосекундного лазерного излучения на эффект дихроизма в золь-гель плёнках оксида цинка с наночастицами серебра (ZnO:Ag). Приведено сравнение действия резонансного и нерезонансного лазерного излучения на эффект дихроизма, показан и объяснён эффект переориентации наночастиц под действием резонансного излучения.

V.R. GRESKO, A.J. DOLGOPOLOV, M.M. SERGEEV
ITMO University, Saint-Petersburg

STUDY OF THE EFFECT OF LASER-INDUCED DICHROISM IN ZINC OXIDE FILMS WITH SILVER NANOPARTICLES

The results of studies on the influence of femtosecond laser radiation parameters on the dichroism effect in sol-gel zinc oxide films with silver nanoparticles (ZnO:Ag) are presented. A comparison of the effect of resonant and non-resonant laser radiation on the dichroism effect is given, the effect of reorientation of nanoparticles under the influence of resonant radiation is shown and explained.

Фемтосекундное лазерное воздействие может индуцировать в материалах содержащих плазмонные наночастицы эффект дихроизма [1]. В случае лазерного воздействия на плёнки оксида цинка с наночастицами серебра дихроизм будет приводить к различному поглощению при различных поляризациях падающего излучения. Таким образом при применении ZnO:Ag в качестве светопоглощающих слоёв в различных устройствах, например фотодетекторах [2], эффективность приборов будет зависеть от поляризации излучения.

Целью работы является экспериментальное исследование влияние поляризации, длины волны и энергетических параметров фемтосекундного лазерного излучения на дихроичные свойства ZnO:Ag плёнок. Лазерное воздействие происходило на установке, изображённой на рис. 1 в режиме сканирования со скоростью 1 мм/с, длительностью

импульса 224 фс, частотой следования импульсов 200 кГц и плотностями энергий от 30 до 131 мДж/см^2. При воздействии использовалось два направления линейной поляризации (рис. 2), а также длины волн 515 и 1030 нм. При использовании резонансного излучения (515 нм) было получено, что положение пиков плазмонного резонанса в спектрах оптической плотности зависело от поляризации излучения в спектрофотометре. При нерезонансном излучении эффект дихроизма отсутствовал.

Причиной появления дихроизма, а также смещения пика плазмонного резонанса является переориентация наночастиц параллельно вектору линейной поляризации лазерного излучения. Такая переориентация приводила к изменению расстояния между частицами и формированию коллективных плазмонных эффектов. Нерезонансное излучение со схожими временными и энергетическими параметрами не приводило к изменение ориентации наночастиц из-за различий в механизме поглощения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ № 24-29-00180

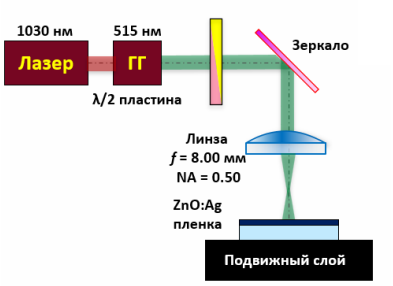


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

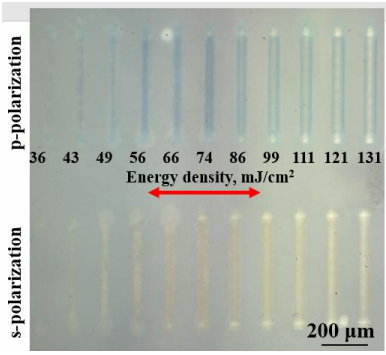


Рис. 2. Фотография дихроичных структур на ZnO:Ag плёнке

Список литературы

1. Podlipensky A.V., et al. // Journal of Luminescence. 2004. V. 109. No. 3-4. P. 135-142.
2. Klochko N.P., et al. //Solar Energy. 2022. V. 232. P. 1-11.

УДК 535(06)+004(06)

А.А. УШКОВ[1], И.С. КАЗАНЦЕВ[2], Д.И. ЯКУБОВСКИЙ[1],
А.В. СЮЙ[1,2], Г.И. ЦЕЛИКОВ[2]
[1]*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный*
[2]*Исследовательский центр новых технологий, XPANCEO, Дубай, ОАЭ*

СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ ИЗ СЛОИСТЫХ ВАН-ДЕР-ВААЛЬСОВЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ АБЛЯЦИИ И ГИБРИДНЫЕ МИКРОСТРУКТУРЫ НА ИХ ОСНОВЕ

Проведён синтез наночастиц методом фемтосекундной лазерной абляции сульфида вольфрама (WS_2) и карбида титана (Ti_3C_2) в ряде растворителей. Полученные коллоиды демонстрируют высокую стабильность, стехиометричность, а также сохраняют важные оптические свойства изначальных кристаллов – наличие экситонных переходов в видимом диапазоне (WS_2) и поглощение в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне (Ti_3C_2). Компактные размеры наночастиц (20 - 60 нм) позволяют встраивать их в пористые микрокапсулы Ca_2CO_3 для задач оптического рассеяния и тераностики, что было продемонстрировано на примере гибридов $CaCO_3$ + Ti_3C_2.

A.A. USHKOV[1], I.S. KAZANTSEV[2] , D.I. YAKUBOVSKY[1],
A.V. SYUY[1,2], G.I. TSELIKOV[2]
[1]*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny*
[2]*Emerging Technologies Research Center XPANCEO, Dubai, United Arab Emirates*

FORMATION OF NANOPARTICLES FROM LAYERED VAN DER WAALS MATERIALS VIA FEMTOSECOND ABLATION AND HYBRID MICROSTRUCTURES BASED ON THEM

We synthesized nanoparticles of WS_2 and Ti_3C_2 in a number of solvents, using a femtosecond laser ablation approach. The resulting colloids exhibit high stability, stoichiometry, and inherit important optical properties of the original crystals - the presence of exciton transitions in the visible range (WS_2) and absorption in the visible and near-infrared (Ti_3C_2). The compact size of nanoparticles (20 - 60 nm) allows their incorporation into porous Ca_2CO_3 microcapsules for optical scattering and theranostics applications, which was demonstrated on $CaCO_3$+Ti_3C_2 hybrids.

Ван-дер-Ваальсовы (ВдВ) материалы, такие как дихалькогениды переходных металлов (ДПМ) [1] и максены [2], широко исследуются для задач оптики, медицины, фотовольтаики. благодаря выдающимся оптическим, электронным и механическим свойствам. В настоящее время стандартными объектами исследований выступают одно- или многослойные кристаллические флейки (хлопья), полученные разнообразными методами эксфолиации объёмных кристаллов или осаждением из паровой фазы. В данной работе рассматриваются коллоиды из сферических ВдВ-наночастиц как перспективный формат использования и изучения ВдВ-материалов. Коллоиды получены методом фемтосекундной лазерной абляции в жидкости.

Целью работы является экспериментальное исследование оптических характеристик полученных коллоидов, их стабильность во времени, а также кристалличность и морфология отдельных наночастиц. На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки лазерной абляции. На рис. 2 показаны результаты синтеза наночастиц карбида титана в трёх разных растворителях – ацетонитрил, ацетон и деионизованная вода. Дифракционные ПЭМ-изображения демонстрируют разную степень кристалличности полученных частиц.



Рис. 1. Схема экспериментальной установки

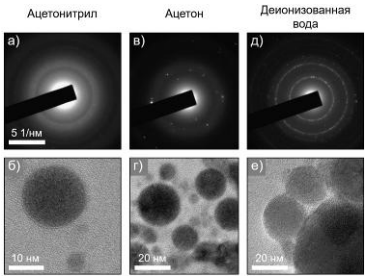


Рис. 2. Дифракционные ПЭМ-изображения (а, в, д) и ПЭМ-фотографии (б, г, е) коллоидных наночастиц Ti_3C_2 в трёх растворителях

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 24-79-00144).

Список литературы

1. Chowdhury T., Sadler E.C., Kempa T.J. // Chemical reviews. 2020. V. 120 (22). P. 12563-12591.

2. Joseph S., Mohan J., et al. // Materials Chemistry and Physics. 2023. V. 297. P. 127332.

УДК 535(06)+004(06)

А.А. ГЛАДСКИХ, Д.Р. ДАДАДЖАНОВ, И.А. ГЛАДСКИХ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННАЯ АНИЗОТРОПИЯ В СЕРЕБРЯНЫХ МАССИВАХ НАНОЧАСТИЦ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ ЗАЩИТЫ ПРОТИВ ПОДДЕЛОК

Предложен новый метод преобразования изотропного самоорганизованного двумерного ансамбля нанесённых серебряных наночастиц в анизотропные метаповерхности с ярко выраженными откликами линейного дихроизма. Первоначально изотропные плотноупакованные массивы наночастиц серебра были получены методами вакуумного термического испарения и подвергнуты линейно поляризованному лазерному освещению. Полученные плёнки демонстрируют сильные сигналы линейного дихроизма из-за избирательного воздействия лазерного облучения и изменения формы наночастиц серебра.

A.A. GLADSKIKH, D.R. DADAJANOV, I.A. GLADSKIKH
ITMO University, Saint-Petersburg

LASER-INDUCED ANISOTROPY IN SILVER NANOPARTICLE ARRAYS FOR ANTI-COUNTERFEITING

A new method is proposed for converting an isotropic self-organized two-dimensional ensemble of supported silver nanoparticles into anisotropic metasurfaces with pronounced linear dichroism responses. Initially, isotropic close-packed arrays of silver nanoparticles were prepared by vacuum thermal evaporation methods and subjected to linearly polarized laser illumination. The resulting films exhibit strong linear dichroism signals due to selective laser irradiation and shape changes of silver nanoparticles.

Применение металлических наночастиц для контроля поляризации излучения, шифрования данных и визуализации подчеркнуло растущую важность исследований сложных анизотропных наноструктур [1]. Это явление связывают прежде всего со снятием вырождения плазмонного резонанса – коллективных колебаний электронов проводимости – при нарушении симметрии наночастиц. В данной работе представлены экспериментальные результаты по резонансному взаимодействию поляризованного лазерного излучения с изотропными гранулированными плёнками серебра, приводящему к образованию анизотропных

метаповерхностей. В зависимости от энергии лазерного излучения наблюдаются такие явления, как изменение формы наночастиц, фрагментация и абляция [2]. Хотя эти процессы хорошо изучены, влияние поляризации лазерного излучения изучено недостаточно.

Обсуждаемый в данной работе метод создания анизотропных метаповерхностей – использование поляризованного лазерного излучения на изначально изотропных случайных наноструктурах, созданных методом вакуумного осаждения, – предлагает экономически эффективный и высокопроизводительный подход.

После формирования плёнок методом термического испарения в газовой фазе плёнки подвергались облучению линейно поляризованным импульсным Nd:YAG-лазером с длиной волны $\lambda = 532$ нм и плотностями энергий $E = 10 - 30$ мДж/см², диаметр пучка $d = 2$ мм.

Воздействие поляризованного лазерного излучения на частицы неправильной формы приводит к их нагреву и изменению формы в сторону более сферической, причём максимальный эффект приходится на частицы, ориентированные вдоль поляризации излучения (в случае, когда излучение попадает в длинноволновую область). При этом частицы, ориентированные перпендикулярно лазерному излучению, остаются незатронутыми, что приводит к появлению сигнала линейного дихроизма. Для плёнки толщиной 5 нм при плотности энергии лазерного излучения 30 мДж/см^2 была достигнута величина линейного дихроизма около 0.12 (рис. 1). Предложено применение полученных метаповерхностей серебра в качестве меток для защиты от подделок (рис. 2).

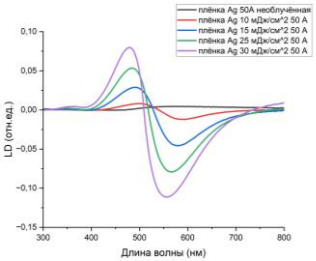


Рис. 1. Спектры линейного дихроизма тонких плёнок серебра на стекле после лазерной модификации

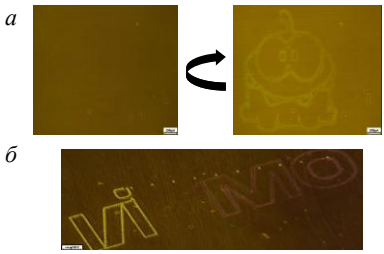


Рис. 2. Визуализация записанных меток вращением одного поляризатора (*а*), двух поляризаторов (*б*)

Список литературы

1. Dalloz N., et al. // Advanced Materials. 2022. V. 34 (2). P. 2104054.
2. Gladskikh P.V., et al. // Optics and spectroscopy. 2020. V. 128 (6). P. 713-718.

УДК 535(06)+004(06)

А.К. АЙМУХАНОВ, А.К. ЗЕЙНИДЕНОВ, Б.Р. ИЛЬЯСОВ[1],
Ж.Ж. АХАТОВА[1], Д.Р. АБЕУОВ , Е.С. ДОСМАГАНБЕТ
Карагандинский государственный университет им. Е.А. Букетова, Казахстан
[1]Астана IT университет, Казахстан

ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ MoS_2 НА ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В этой работе наночастицы MoS_2 были включены в слои объёмного гетероперехода (BHJ) P3HT:PC61BM и было подробно исследовано влияние их взаимодействия на фотоэлектрические характеристики солнечных элементов P3HT:PC61BM BHJ.

A.K. AIMUKHANOV, A.K. ZEINIDENOV, B.R. ILYASSOV[1],
Zh.Zh. AKHATOVA[1], D.R. ABEUOV, E.S. DOSMAGANBET
Buketov Karaganda University, Kazakhstan
[1]Astana IT University, Kazakhstan

THE EFFECT OF MoS_2 NANOPARTICLES ON THE VOLT-AMPERE CHARACTERISTICS OF SOLAR CELLS

In this work, MoS_2 nanoparticles were incorporated into P3HT:PC61BM bulk heterojunction (BHJ) layers and the effect of their interaction on the photovoltaic characteristics of P3HT:PC61BM BHJ solar cells was studied in detail.

OSCs на основе органических молекул и полупроводниковых полимеров привлекают внимание ведущих исследовательских центров и производителей солнечных панелей благодаря своим недорогим и простым технологиям изготовления [1, 2]. На основе плёнок MoS_2 - NP P3HT:PC61BM в качестве фотоактивных слоёв были изготовлены органические солнечные элементы и изучено влияние наночастиц MoS_2 на фотоэлектрические характеристики. Изготовленные устройства имеют инвертированную структуру. На рис. 1 представлены вольт-амперные характеристики изготовленных органических солнечных элементов на основе нелегированного слоя P3HT:PC61BM и с различными концентрациями наночастиц MoS_2 в P3HT:PC61BM BHJ.

Как видно из табл. 1, сначала увеличение концентрации MoS_2 с 0 до 0,5 % приводит к улучшению характеристик фотоэлектрической системы. Мы наблюдаем рост плотности тока короткого замыкания (J_{SC}), напряжения холостого хода (V_{OC}), коэффициента заполнения (FF), что в

целом способствует повышению эффективности преобразования мощности (η). Для сравнения, устройство, основанное на чистом P3HT:PC61BM BHJ, показало $J_{SC} = 5.01$ мА/см^2, $V_{OC} = 0.46$, $FF = 0.39$ и 0.90 % соответственно, в то время как устройство-champion, основанное на P3HT:PC61BM BHJ с MoS_2 - NP в концентрации 0.50 %, показало $J_{SC} = 9.1$ мА/см^2, $V_{OC} = 0.76$, FF = 0.43 и 2.97 % соответственно. PCE был увеличен в три раза.

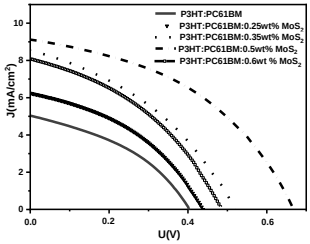


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики устройств FTO/ZnO: P3HT: PC61BM: MoS_2/PEDOT:PSS/Ag

Однако дальнейшее увеличение концентрации MoS_2 до 0.6 % привело к ухудшению характеристик фотоэлектрической системы. FF устройств изменился незначительно, поскольку он существенно зависит от проводимости электронных и дырочных транспортных слоёв, ZnO и PEDOT:PSS слоёв, соответственно, которые не были модифицированы. Принимая во внимание, что J_{SC} и V_{OC} показали значительные изменения, связанные с тем, что оба параметра чувствительны к свойствам BHJ, которые были модифицированы легированием MoS_2.

Таблица 1. Параметры вольт-амперных характеристик солнечных элементов

Device	J_{sc}, (mA/cm^2)	J_{max}, (mA/cm^2)	V_{oc} (V)	V_{max} (V)	*FF*	η, %
P3HT+PC61BM	5.01	3.17	0.46	0.29	0.39	0.9 ± 0.05
P3HT+PC61BM:0.25wt % MoS_2	6.27	3.97	0.50	0.32	0.40	1.25 ± 0.05
P3HT+PC61BM:0.35wt % MoS_2	8.5	5.28	0.55	0.37	0.41	2.1 ± 0.05
P3HT+PC61BM:0.5wt % MoS_2	9.1	6.01	0.76	0.5	0.43	2.97 ± 0.05
P3HT+PC61BM:0.6wt % MoS_2	8.05	5.12	0.55	0.34	0.40	2.13 ± 0.05

Список литературы

1. Liu Q., Jiang Y., Jin K., Qin J., Xu J., Li W., Xiong J., Liu J., Xiao Z., Sun K., et al. 18 % Efficiency organic solar cells // Sci. Bull. 2020. V. 65. P. 272-275.

2. Novoselov K.S., Jiang D., Schedin F., et al. Two-dimensional atomic crystals // Proceeding of the Nat. Acad. of Science of the USA. 2005. V. 102 (30). P. 10451-10453.

УДК 535(06)+004(06)

М.Д. МИРУЩЕНКО, К.Д. КОСОЛАПОВА, С.А. ЧЕРЕВКОВ, Е.В. УШАКОВА
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УГЛЕРОДНЫХ НАНОЧАСТИЦ, ОБРАБОТАННЫХ ПОЛИМЕРАМИ

Исследованы углеродные наночастицы (УНЧ) различных составов и влияние добавок различных полимеров или способов синтеза на их морфологию, а также энергетическую структуру и оптические свойства. Полученные результаты позволяют определить наиболее оптимальные параметры синтеза и полимерной обработки УНЧ для улучшения необходимых характеристик, как высокий квантовый выход, так и способность к образованию равномерных плёнок.

M.D. MIRUSCHENKO, K.D. KOSOLAPOVA, S.A. CHEREVKOV, E.V. USHAKOVA
ITMO University, Saint-Petersburg

INVESTIGATION OF THE MORPHOLOGY, ENERGY STRUCTURE AND OPTICAL PROPERTIES OF CARBON NANOPARTICLES TREATED WITH POLYMERS

Carbon nanoparticles (CNPs) of various compositions were investigated, along with the influence of different polymer additives or synthesis methods on their morphology, as well as their energy structure and optical properties. The obtained results allow for the determination of the most optimal parameters for the synthesis and polymer treatment of CNPs to improve the necessary characteristics, such as high quantum yield and the ability to form uniform films.

Углеродные наночастицы (УНЧ) представляют собой наночастицы размером менее 10 нм, состоящие из различных аллотропных модификаций углерода. Они обладают уникальными характеристиками, такими как высокая фотостабильность, химическая инертность, поглощение и излучение света в оптическом диапазоне, а также лёгкой внедряемостью в различные полимерные матрицы [1]. Всё это делает углеродные точки перспективными для применения в биомедицине, сенсорике, светодиодах, солнечных батареях и других областях [2, 3]. Оптические свойства УНЧ зависят от их структуры и химического состава, а также от типов оптических центров, которые можно контролировать изменением параметров синтеза или постсинтетической

функционализацией. Таким образом, задача разработки методов синтеза и функционализации с установлением зависимостей энергетической структуры от химического состава и морфологии является актуальной.

Целью работы является исследование морфологии, энергетической структуры и оптических свойств УНЧ различных составов, функционализированных различными полимерами, такими как полиэтиленгликоль (ПЭГ), полиаллиламина гидрохлорид (ПАГ) и полистиролсульфонат (ПСС). УНЧ были получены гидротермальным методом с использованием бензойной, лимонной кислот или о фенилендиамина и этилендиамина, при этом были получены как гидрофильные, так и амфифильные УНЧ. Морфология отдельных УНЧ была изучена методом атомно-силовой микроскопии (АСМ), а нанесённых на подложку тонких плёнок из УНЧ – лазерной сканирующей микроскопией (ЛСМ). Для исследования энергетический структуры УНЧ, а именно получения информации о положениях уровней энергии низшей вакантной молекулярной орбитали (НВМО) и высшей заселённой молекулярной орбитали (ВЗМО) использована комбинация методов циклической вольтамперометрии (ЦВАМ) и оптической спектроскопии, данные, полученные этим методом были подтверждены с помощью ультрафиолетовой фотоэлектронная спектроскопия (УФЭС).

Оказалось, что обработка полимерами непосредственно в процессе синтеза не влияет в значительной степени на морфологию УНЧ, а при дополнительной обработке их размеры значительно изменяются. При этом полиэтиленгликоль, добавленный в процессе синтеза не изменяет оптические свойства УНЧ, но при этом может повышать их квантовый выход фотолюминесценции. Обработка уже готовых УНЧ с помощью ПАГ и ПСС в значительной степени изменяет их оптические свойства и энергетическую структуру. При этом эти полимеры являются положительно- и отрицательнозаряженными, соответственно, что также может влиять на положения НВМО и ВЗМО за счёт взаимодействия заряда, вносимого полимером, с электронами в sp2-доменах УНЧ.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы «Приоритет 2030».

Список литературы

1. Stepanidenko E.A., Ushakova E.V., et al. // Applications of Carbon Dots in Optoelectronics. 2021. V. 11 (2). P. 364.

2. Cherevkov S.A., Stepanidenko E.A., et al. // Amphiphilic acetylacetone-based carbon dots. 2024. V. 12 (11). P. 3943.

3. Margaryan I.V., Vedernikova A.A., et al. // Nitrogen-rich carbon dots as the antisolvent additive for perovskite-based photovoltaic devices. 2024. V. 35 (43). P. 435705.

УДК 535(06)+004(06)

Н.Ю. КРУЧИНИН, М.Г. КУЧЕРЕНКО
Оренбургский государственный университет

КОНФОРМАЦИОННАЯ СТРУКТУРА СОСТОЯЩЕГО ИЗ ДВУХ РАЗНОИМЁННО ЗАРЯЖЕННЫХ ФРАГМЕНТОВ БЛОКА-СОПОЛИМЕРА, АДСОРБИРОВАННОГО НА ПОЛЯРИЗОВАННОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ НАНОЧАСТИЦЕ

Используя молекулярно-динамическое моделирование исследовано изменение конформаций макромолекулярной оболочки, состоящей из двух разноимённо заряженных полиэлектролитов, объединённых в блок-сополимер, на поверхности поляризованной сферической металлической наночастицы. Разработана математическая модель структуры цепи блок-сополимера, адсорбированной на поляризованной сферической наночастице, для случаев полиэлектролитных блоков большой и малой длины.

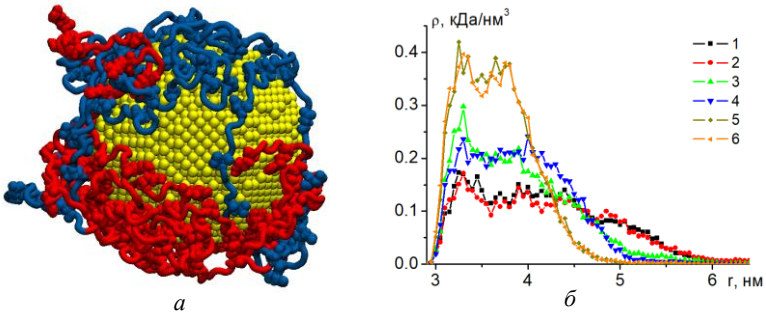
N.Yu. KRUCHININ, M.G. KUCHERENKO
Orenburg State University

CONFORMATIONAL STRUCTURE OF A BLOCK COPOLYMER CONSISTENT OF TWO OPPOSITELY CHARGED FRAGMENTS ADSORBED ON A POLARIZED SPHERICAL METAL NANOPARTICLE

Using molecular dynamics modeling, the change in the conformations of the macromolecular shell consisting of two oppositely charged polyelectrolytes combined into a block copolymer on the surface of a polarized spherical metal nanoparticle was studied. A mathematical model of the structure of the block copolymer chain adsorbed on a polarized spherical nanoparticle was developed for the cases of polyelectrolyte blocks of large and small length.

Комплекс из молекул разноимённо заряженных полиэлектролитов или составленный из них блок-сополимер образуют на поверхности неполяризованной сферической наночастицы плотно обволакивающую макромолекулярную оболочку [1]. На поверхности поляризованной сферической золотой наночастицы радиусом 3 нм (рис. 1*а*) по мере увеличения дипольного момента наночастицы заряженные фрагменты блока-сополимера постепенно смещались на противоположно заряженные полюса наночастицы. На рис. 1*б* изображены радиальные распределения

средней плотности атомов комплексов противоположно заряженных полиэлектролитов и составленных блок-сополимеров, адсорбированных на поляризованной золотой наночастице. Видно, что кривые для комплекса полипептидов и составленного из них блока-сополимера (1 и 2, 3 и 4, 5 и 6) схожи друг с другом. При этом на полюсах образовывались шапки из разноимённо заряженных полиэлектролитов или фрагментов блок-сополимера, которые всё сильнее набухали при увеличении дипольного момента наночастицы, причём тем сильнее, чем больше было расстояние между заряженными звеньями в макромолекуле (рис. 1*б*, кривые 1 и 2).



а *б*

Рис. 1. Блок-сополимер из 800 аминокислотных остатков на поверхности поляризованной в вертикальном направлении наночастицы, красным цветом изображены положительно заряженный, а синим отрицательно заряженный фрагмент блок-сополимера (*а*), радиальные распределения средней плотности атомов комплекса полиэлектролитов (1, 3, 5) и блок-сополимеров (2, 4, 6) на поверхности поляризованной наночастицы диаметром 6 нм (*б*)

Разработанная математическая модель структуры цепи из блока-сополимера, адсорбированной на поляризованной сферической наночастице, в случае полиэлектролитных блоков большой длины также демонстрирует сепарацию разноимённо заряженных блоков по направлению к полюсам противоположного знака.

Результаты могут найти применение при создании и улучшении характеристик сенсоров и нанозондов, работа которых основана на эффекте гигантского комбинационного рассеяния, а также в других устройствах наноэлектроники.

Список литературы

1. Кручинин Н.Ю., Кучеренко М.Г. // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 2023. Т. 65. № 2. С. 150-160.

Л.А. ОТПУЩЕННИКОВ[1], Д.С. ГЕЦ[1], Л.Е. ЗЕЛЕНКОВ[1,2]
[1]Университет ИТМО, Санкт-Петербург
[2]Харбинский инженерный университет, Циндао, Китай

ДОПИРОВАНИЕ НАНОКРИСТАЛЛОВ И КВАНТОВЫХ ТОЧЕК СВИНЦОВО-ГАЛОГЕНИДНОГО ПЕРОВСКИТА КАТИОНАМИ РУБИДИЯ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В НАНОФОТОНИКЕ И ОПТОЭЛЕКТРОНИКЕ

Описан метод улучшения характеристик нанокристаллов и квантовых точек свинцово-галогенидного перовскита $CsPbBr_3$ путём легирования A-положения катионами рубидия. Эффективность данного подхода подтверждается его использованием для изготовления высокоэффективных светоизлучающих устройств и лазеров на основе двухмерных и объёмных перовскитных материалов. Показана целесообразность модификации более низкоразмерных структур для улучшения их фотофизических характеристик и расширения сфер применения.

L.A. OTPUSHCHENNIKOV[1], D.S. GETS[1], L.E. ZELENKOV[1,2]
[1]ITMO University, Saint-Petersburg
[2]Harbin Engineering University, Qingdao, China

DOPING OF LEAD-HALIDE PEROVSKITE NANOCRYSTALS AND QUANTUM DOTS WITH RUBIDIUM CATIONS FOR NANOPHOTONICS AND OPTOELECTRONICS

In this work the method for enhancing the properties of $CsPbBr_3$ lead-halide perovskite nanocrystals and quantum dots via substitution of A-site with rubidium cations is described. The effectiveness of this approach is demonstrated by its application in fabricating highly efficient light-emitting devices and lasers fabricated with 2D and bulk perovskite materials. The potential of modifying low-dimensional perovskite structures to improve their photophysical properties and broad their applicability in nanophotonics is shown.

Свинцово-галогенидные перовскиты являются перспективными материалами для нанофотоники и оптоэлектроники. Уже сегодня они применяются для создания светодиодов, солнечных элементов и лазерных устройств [1]. Однако они всё ещё уступают многим аналогам из-за неустойчивости в атмосферных условиях и низкой эффективности устройств на их основе. Для решения данных проблем происходит переход к более низкоразмерным структурам, таким как нанокристаллы и

квантовые точки. В данной работе рассматривается перспективность легирования A-положения перовскитных наночастиц катионами рубидия для улучшения их свойств и применения оптоэлектронных устройствах.

$CsPbBr_3$ является одним из наиболее устойчивых свинцово-галогенидных перовскитов, при этом $RbPbBr_3$ перовскитом не является. Однако, поскольку катион рубидия имеет меньший радиус, он может встраиваться в кристаллическую решётку и пассивировать дефекты, а также стабилизировать поверхность [2, 3]. Таким образом, частичная замена катионов цезия на рубидий при синтезе улучшит морфологию кристаллов и их оптические характеристики.

Допирование свинцово-галогенидных перовскитов рубидием уже использовалось для изготовления светодиодов и лазеров. Преимущественно эти разработки ведутся для получения девайсов с синим эмиссионным спектром из-за увеличения ширины запрещённой зоны при внедрении катионов меньшего радиуса. В большинстве работ рассматриваются 2D и 3D-материалы. Однако использование квантовых точек и нанокристаллов перовскита позволит создать оптоэлектронные устройства с большей эффективностью и лазерные системы нового поколения. Динамика носителей заряда в них играет ключевую роль. Применение нульмерных материалов позволит контролировать динамику носителей более прецизионно, а легирование раскроет новые особенности этих материалов и расширит перспективы использования [4 - 9].

Введение рубидия способствует заполнению вакансий внутри кристаллов и на их поверхности, из-за чего уменьшается дефектность наночастиц и снижается количество безызлучательных рекомбинаций. В нанокристаллах формируются энергетические подуровни, вызванные искажением решётки при внедрении катионов меньшего радиуса. Это сокращает количество путей рекомбинации и упрощает создание инверсии населенности в материале, что делает его перспективным для лазерных технологий [8 - 10].

Список литературы

1. Zhang L., Mei L., Wang K., et al. // Nano-Micro Lett. 2023. V. 15. No. 177.
2. Li C., Lu X., Ding W., et al. // Acta Cryst. 2008. V. B64. P. 702-707.
3. Hautzinger M.P., Mihalyi-Koch W., Jin S. // Chem. Mater. 2024. V. 36 (21). P. 10408-10420.
4. Jiang Y., Qin C., Cui M., et al. // Nat. Commun. 2019. V. 10 (1). No. 1868.
5. Qin Z., Wang S., Zhu Y., et al. // Nano Energy. 2024. V. 121. P. 109263.
6. Chu Z., You J. // Adv. Mater. 2024. V. 36 (47). No. 2409867.
7. Li B., Mao W., Liang S., et al. // Photon. Res. 2024. V. 11 (6). P. 1067-1074.
8. Lu G., Wang X., Jing X., et al. // ACS Nano. 2024. V. 18. P. 23457-23467.
9. Ko P.K., Chen D., Li C.-H., et al. // Chem. Mater. 2024 V. 36. P. 3735-3744.
10. Sun S., Gao X., Shi Z., et al. // Adv. Opt. Mater. 2021. V. 8 (24). P. 2102689.

УДК 535(06)+004(06)

М.К. БЕЙСЕМБЕКОВ, Г.И. ОМАРБЕКОВА,
А.К. ЗЕЙНИДЕНОВ, А.К. АЙМУХАНОВ
Карагандинский государственный университет им. Е.А. Букетова, Казахстан

ВЛИЯНИЕ СРЕДЫ ОТЖИГА НА МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЁНОК NiO_x

В данной работе плёнки NiO_x были синтезированы золь-гель методом и отожжены при температуре 300 °С на воздухе, в инертном газе азоте (N_2), кислороде (O_2) и вакууме. Было исследовано влияние среды отжига тонких плёнок оксида никеля (NiO_x) на его структурные свойства.

M.K. BEISEMBEKOV, G.I. OMARBEKOVA,
A.K. AIMUKHANOV, A.K. ZEINIDENOV
Buketov Karaganda University, Kazakhstan

THE EFFECT OF THE ANNEALING MEDIUM ON THE MORPHOLOGICAL PROPERTIES OF NiO_x FILMS

In this case, NiO_x films were synthesized by the sol-gel method and annealed at a temperature of 300 °C in air, inert gas nitrogen (N_2), oxygen (O_2) and vacuum. The effect of the annealing medium of thin films of nickel oxide (NiO_x) on its structural properties was investigated.

Прозрачные проводящие оксидные материалы представляют большой интерес благодаря своим отличительным физическим, химическим и оптоэлектронным свойствам. Среди них наноструктурные плёнки оксида никеля (NiO_x) привлекают значительное внимание благодаря своим уникальным структурным, электрическим и оптическим свойствам [1, 2]. Проведённые многочисленные исследования добились значительного прогресса в разработке и улучшении свойств NiO_x, что привело к его широкому распространению в различных электронных устройствах, такие как тонкоплёночные транзисторы, фотоэлектрические элементы, светодиоды, датчики, запоминающие устройства и катализаторы [3].

На рис. 1 представлены АСМ-изображения поверхности плёнок NiO_x, отожжённые в воздухе, N_2, O_2 и вакууме. Из рис. 1а видно, что морфология поверхности NiO_x отожжённого на воздухе имеет плотную зернистую структуру с шероховатостью поверхности равной R_a = 7, 85 нм, средний размер частиц составляет 4,5 нм. Распределение частиц на поверхности плёнок находится в пределах от 2 до 7 нм. При отжиге в N_2

плёнка наблюдается равномерная и мелкозернистая структура с шероховатостью R_a = 5,40 нм, при среднем размере зерна 3,5 нм. Полученные данные по распределению частиц показывают, что разброс значений находится в пределах от 2 до 6 нм (рис. 1b). Плёнка, отожжённая в O_2, показала мелкозернистую структуры с шероховатостью R_a = 6,83 нм и средним размером зерна 4,5 нм, разброс полученных значений по дисперсности частиц находится в пределах от 3 до 6 нм (рис. 1c). Максимальное значение шероховатости поверхности R_a = 7,90 нм и среднего размера зерна 5,0 нм наблюдается у плёнок, отожжённых в вакууме. Также у данных плёнок наблюдается максимальный разброс частиц и находится в пределах от 2 до 8 нм (рис. 1d).

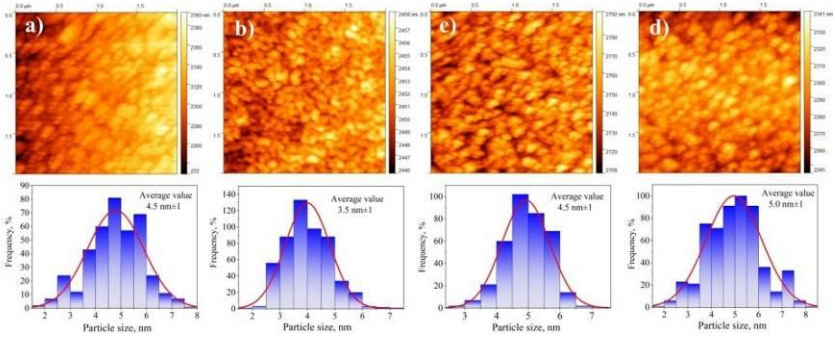


Рис. 1. АСМ-изображение поверхности и средний размер частиц плёнок NiO_x, отожжённых при 300 °C в воздухе (a), N_2 (b), O_2 (c), в вакууме (d)

Список литературы

1. Imran M., Coskun H., Khan A.N., Ouyang J. Role of annealing temperature of nickel oxide (NiO_x) as hole transport layer in work function alignment with perovskite // Applied Physics A. 2021. V. 127 (2).

2. Aimukhanov A.K., Zeinidenov A.K., Omarbekova G.I., Plotnikova I.V. Investigation of optical and electrophysical characteristics of composite films nio/pedot:pss // Eurasian Physical Technical Journal. 2020. V. 17 (34).

3. Irwin M.D., Buchholz D.B., Hains A.W., Chang R.P., Marks J.T. p-Type semiconducting nickel oxide as an efficiency-enhancing anode interfacial layer in polymer bulk-heterojunction solar cells // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2008. V. 105 (8).

А.В. ИЛЬИНСКИЙ, Р.А. КАСТРО[1], В.А. КЛИМОВ,
А.А. КОНОНОВ[1], П.С. ПРОВОТОРОВ[1], И.О. ТИМОФЕЕВА[1],
Е.Б. ШАДРИН, А.Д. БЕРДНИКОВА[1]
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
[1]Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург

СПЕКТРОМЕТРИЯ ПЛЁНОК AgI, ЛЕГИРОВАННЫХ Cu

В работе изучено влияние легирование медью на коэффициент поглощения поликристаллических плёнок йодида серебра толщиной около 80 нм. Обнаружено, что увеличение концентрации меди приводит к смещению пика в область низких энергий.

A.V. ILYINSKY, R.A. CASTRO[1], V.A. KLIMOV,
A.A. KONONOV[1], P.S. PROVOTOROV[1], I.O. TIMOFEEVA[1],
E.B. SHADRIN, A.D. BERDNIKOVA[1]
Ioffe Institute, Saint-Petersburg
[1]Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint-Petersburg

SPECTROMETRY OF AgI FILMS DOPED Cu

The effect of copper alloying on the absorption coefficient of polycrystalline silver iodide films with a thickness of about 80 nm was studied. It was found that an increase in the concentration of copper leads to a shift of the peak to the low energy region.

Йодид серебра – материал с фазовым переходом (ФП) полупроводник-суперионный проводник при температуре 147 ^{O}C – используемый для создания суперконденсаторов, ионисторов, источников тока, преобразователей энергии и информации и других устройств [1 - 3]. Исследованные плёнки AgI, легированные Cu (содержание меди 5, 8 и 20 объёмных %), были синтезированы на слюдяной подложке. Первая стадия синтеза состояла в нанесении на высококачественную (оптическую) слюду толщиной 40 мкм методом испарения в вакууме тонкого (80 нм) слоя металлов Ag+Cu. На второй стадии синтеза при 170 ^{o}C выполнялось йодирование комбинированного металлического слоя. Исследование оптических свойств проводилось на спектрофотометре СФ-2000.

На рис. 1 представлена зависимость коэффициента поглощения от энергии квантов падающего излучения. Наблюдается смещение пика

экситонного поглощения при увеличении концентрации меди в область низких энергий. Сам пик поглощения приходится на 425 - 435 нм. Ширина запрещённой зоны получается около 2,76 (для низких концентраций меди) – 2,79 (для высоких концентраций меди) эВ.

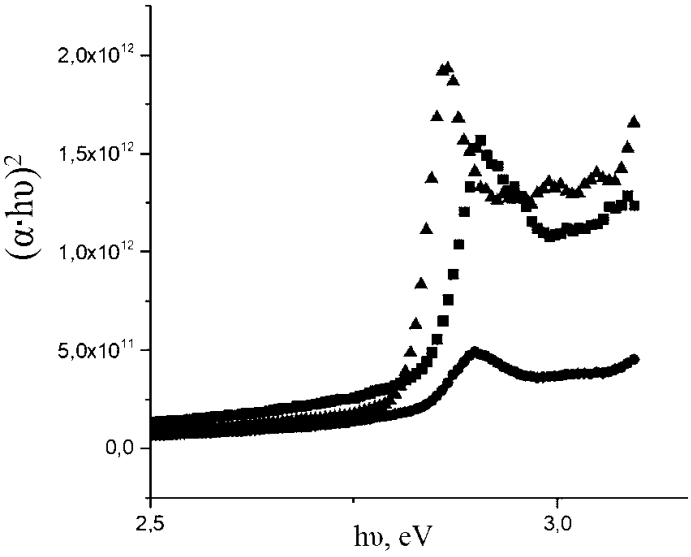


Рис. 1. Зависимость коэффициента поглощения для поликристаллических плёнок AgI легированных Cu: 5 (квадраты), 8 (круги) и 20 (треугольники) объёмных % при комнатной температуре

Список литературы

1. Alshehri A.M., Rhan Z.R., et al. // Materials Science in Semiconductor Processing. 2022. V. 137. P. 106239.

2. Gnanavel M., Sunandana C.S. // Proceedings of SPIE. 2009. V. 7394. P. 73942D.

3. Kruger E., Seifert M., et al. // AIP Advances. 2023. V. 13. P. 035117.

УДК 535(06)+004(06)

А.П. СИГАЕВ, И.А. ФИЛИППОВ, И.А. ПРОНИН,
А.А. КАРМАНОВ, Н.Д. ЯКУШОВА
Пензенский государственный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВЕННОГО СОСТАВА МНОГОСЛОЙНЫХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЁНОК $BiFeO_3$ МЕТОДОМ ИК ФУРЬЕ-СПЕКТРОСКОПИИ

По разработанной методике синтезированы многослойные сегнетоэлектрические плёнки феррита висмута с использованием золь-гель метода. Приведены результаты исследования с помощью ИК фурье-спектроскопии изменения качественного состава полученных плёнок $BiFeO_3$ в зависимости от стадии их термической обработки.

A.P. SIGAEV, I.A. FILIPPOV, I.A. PRONIN, A.A. KARMANOV,
N.D. YAKUSHOVA
Penza State University

INVESTIGATION OF THE QUALITATIVE COMPOSITION OF MULTILAYER FERROELECTRIC $BiFeO_3$ FILMS BY IR FOURIER SPECTROSCOPY

According to the developed method multilayer ferroelectric films of bismuth ferrite were synthesized using the sol-gel method. The results of a study by IR Fourier spectroscopy of changes in the qualitative composition of the obtained $BiFeO_3$ films depending on the stage of their heat treatment are presented.

Феррит висмута $BiFeO_3$ из-за своих отличительных свойств является наиболее перспективным мультиферроиком для практического применения, в том числе в устройствах функциональной электроники.

В рамках золь-гель метода порошки нитратов железа и висмута растворялись в 2-метоксиэтаноле с добавлением уксусной кислоты для дегидратации и этаноламина для контроля вязкости. Полученный раствор перемешивался при температуре 60 °С в течение 2,5 ч. Приготовленный золь созревал в течение 16 ч при комнатной температуре. Каждый из десяти слоёв сегнетоэлектрических плёнок $BiFeO_3$, сформированных на металлических подложках, был нанесен центрифугированием и последовательно подвергнут предварительной сушке при 200 °С в течение 5 мин и окончательному термическому отжигу при 650 °С в течение 20 мин в воздушной среде.

С помощью ИК фурье-спектроскопии получены ИК-спектры пропускания (рис. 1) изготовленных плёнок $BiFeO_3$ на разных стадиях их термической обработки. ИК-спектр плёнки $BiFeO_3$ после предварительной сушки имеет широкую полосу поглощения (3000 - 3600) $см^{-1}$, соответствующую валентным симметричным колебаниям ОН-групп. Пик поглощения при 2970 $см^{-1}$ характеризует валентные асимметричные колебания CH_3. Пик поглощения, представленный в диапазоне (1550 - 1650) $см^{-1}$, соответствуют деформационным колебаниям связей Н-О-Н. Деформационные колебания связей С−О−Н представлены пиком поглощения 1320 $см^{-1}$, а валентные колебания связей С−О – пиком поглощения 1120 $см^{-1.}$ Наличие на ИК-спектре пиков поглощения 825, 1005, 1060 $см^{-1}$, вероятно, может быть связано с присутствием ионов нитратов [1]. После термического отжига на ИК-спектре плёнки $BiFeO_3$ пики поглощения, связанные с органическими соединениями, водой и ионами нитратов, исчезли. Совокупность пиков поглощения 455, 510, 573 $см^{-1}$ связана с валентными и деформационными колебаниями Fe–O, характеризующими октаэдрические группы FeO_6 в перовскитных структурах [2]. Пик поглощения 815 $см^{-1}$ в плёнках $BiFeO_3$ указывает на высокую кристаллическую упорядоченность материала, а пик поглощения 865 $см^{-1}$ обусловлен валентными колебаниями Bi–O.

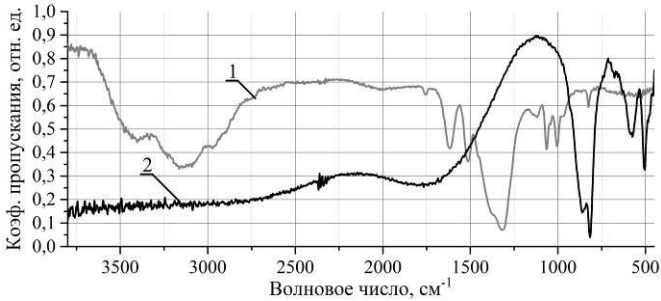


Рис. 1. ИК-спектры пропускания плёнок $BiFeO_3$ после предварительной сушки (1) и после термического отжига (2) в спектральном диапазоне 3800 – 450 $см^{-1}$

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания на проведение НИР № 124041700069-0.

Список литературы

1. Srivastav S.K., Gajbhiye N.S. // Journal of American Ceramic Society. 2012. V. 95 (11). P. 3678.
2. Dhanya S.R., Nair S.G., et al. // AIP Conference Proceedings. 2019. V. 2166 (1). P. 020017.

УДК 535(06)+004(06)

Д.А. ЖУРАВЛЁВ, А.А. КОРНЕЕВА, А.А. БЫКОВ, П.В. ЗИНИН
Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПРОВОДИМОСТИ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПЛЁНОК МЕТОДОМ ВАН ДЕР ПАУ

В работе описаны результаты эксперимента по осаждению BC_x-плёнки на кварцевую подложку с для измерения свойств её проводимости методом Ван дер Пау при помощи установки импульсного лазерного осаждения алмазоподобных плёнок, разработанной в НТЦ УП РАН. Проведено измерение комбинационного рассеяния для оценки характера её структуры, а также измерение удельного сопротивления образца. В результате эксперимента получена алмазоподобная плёнка с проводящими свойствами.

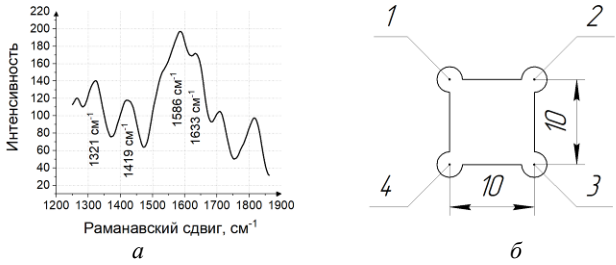
D.A. ZHURAVLYOV, A.A. KORNEEVA, A.A. BYKOV, P.V. ZININ
Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow

STUDY OF CONDUCTIVITY PROPERTIES OF DIAMOND-LIKE FILMS BY VAN DER PAUW METHOD

The work provides the results of an experiment on deposition of a BC_x film a quartz substrate to measure its conductivity properties via the Van der Pauw method using a pulsed laser deposition unit developed in STC UI RAS. Raman spectroscopy was carried out to evaluate the nature of its structure and the resistivity of the sample was measured. As a result of the experiment, a diamond-like film with conductive properties.

Развитие материалов и технологий изготовления элементов микроэлектроники позволит улучшить эксплуатационные характеристики приборов, в особенности тех, которые работают в тяжёлых условиях (например, в агрессивных средах). Наиболее перспективными являются соединения BC_x. Бор-углеродные плёнки обладают высокой твёрдостью, химически устойчивы, биологически совместимы с тканями организма и представляют интерес в машиностроении, микроэлектронике и медицине [1]. Хотя углеродные структуры сами по себе являются диэлектриками, встраивание в них атомов бора способствует возникновению проводимости. Следует заметить, что их добавление также несколько ухудшает механические свойства алмазоподобных структур, получаемых в плёнке. Обзор литературы показал, что наиболее подходящим методом получения плёночных структур, является метод лазерного напыления

[2 - 4]. Метод импульсного лазерного напыления также обеспечивает возможность варьирования параметров процесса для улучшения характеристик получаемых плёнок из различных материалов и является менее опасным, чем химические методы. В работе представлены результаты исследования свойств проводимости алмазоподобной плёнки, легированной бором, полученной методом лазерного осаждения в вакуумной среде. Приведены результаты измерения пиков комбинационного рассеяния (рис. 1*а*) и удельного сопротивления образца методом Ван дер Пау (измеренное удельное сопротивление R = 1,261 МОм). Схема измерения представлена на рис. 1*б*. Для получения формы плёнки, позволяющей провести измерения удельного сопротивления данным методом, перед подложкой размещалась тонкая маска.



а *б*

Рис. 1. Спектр комбинационного рассеяния с характерными алмазоподобной структуре пиками (*а*), схема измерения проводимости в образце (*б*)

Работа выполнена в рамках Государственного задания Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН «Разработка новых методов и средств для изучения поведения вещества в условиях высоких давлений и температур» (FFNS-2022-0008).

Список литературы

1. Singh R., Narayan J. Pulsed-laser evaporation technique for deposition of thin films: Physics and theoretical model // Physical Review B. 1990. V. 41. No. 13. P. 8843-8859.

2. Lu Y., Huang G., Wang S. et al. A review on diamond-like carbon films grown by pulsed laser deposition // Applied Surface Science. 2021. V. 541. P. 148573.

3. Fominski V.Y., Romanov R.I., Vasil'evskii I.S., et al. Structural, electrical and mechanical properties of BCx films prepared by pulsed laser deposition from mixed and dual boron-diamond/graphite targets // Diamond and Related Materials. 2019. V. 92. No. 1. P. 266-277.

4. Быков А.А., Андреев А.В., Корнеева А.А. и др. Импульсное лазерное осаждение проводящего алмазоподобного бор-содержащего покрытия для зонда атомно-силового микроскопа // Физические основы приборостроения. 2023. Т. 12. № 3 (49). С. 100-105.

УДК 535(06)+004(06)

Т.А. ХУДАЙБЕРГАНОВ
Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых

РАСЧЁТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ РЕШЁТКИ АЛМАЗА

На основании анализа собственных значений динамической матрицы были получен фононный спектр в направлении [111]. На основании полученного фононного спектра был проведён расчёт теплопроводности алмаза в зависимости от температуры вдоль направления [111].

T.A. KHUDAIBERGANOV
Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs

CALCULATION OF THE THERMAL CONDUCTIVITY OF THE DIAMOND LATTICE

Based on the analysis of the eigenvalues of the dynamic matrix, the phonon spectrum in the [111] direction was obtained. Based on the obtained phonon spectrum, the thermal conductivity of diamond was calculated as a function of temperature along the [111] direction.

Алмаз – это метастабильная форма углерода с гранецетрированной кубической решёткой Браве. Каждый атом углерода находится в центре тяжести четырёх соседних атомов образованных ковалентой связью, создавая образ тэтраэдера с валентными углами 109 °28 ’.

Целью данной работы является ab initio исследование зависимости теплопроводности алмаза от температуры, что будет способствовать дальнейшему учёту этих особенностей в моделировании уравнения теплопроводности в процессе лазерной графитизации.

Две акустические (TA) ветки (рис. 1), частоты которых стремятся к нулю в длинноволновом пределе $q \to 0$. Это свойство обусловлено трансляционной симметрией кристалла и характерно для всех фононных спектров. На рис. 1б показано, что длинноволновые колебания при силовой константе $\mu = 0.16 \times 10^4$ делают систему неустойчивой к малым возмущениям в системе и приводят к разрушению решётки.

Фононный вклад в теплопроводность вдоль направления (h, k, l) можно записать как интеграл, от изохорной теплоёмкости, просуммированный по всем модам и умноженный на групповую скорость v_g и длину свободного пробега Λ [3 - 5]:

$$k = \frac{1}{3}\sum_{q_{hkl}} v_g \Lambda \int_0^{\omega_D} C(\omega_{q_{hkl}}) d\omega_{q_{hkl}}, \quad (1)$$

здесь идёт суммирование по модам q = 1, …, 6; $\omega_D = k_Б T/\hbar$ – дебаевская температура.

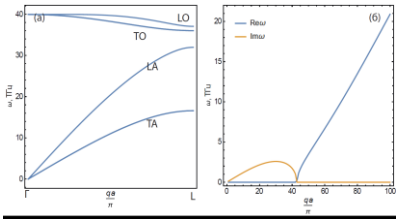


Рис. 1. Дисперсия продольной акустической (LA), поперечной акустической (TA), продольной оптической (LO) и поперечной оптической (TO) фононных веток решётки алмаза вдоль направления симметрии Γ – L, параметры (Н/м) [2]: a = 15.7 × 10^4; b = 4.4 × 10^4; l = −2.06 × 10^4; μ = 2.26 × 10^4; ν = 2.70 × 10^4; δ = 1.03 × 10^4 (а); действительная и мнимая части квадратного корня первого собственного значения динамической матрицы при μ = 0.16 × 10^4 (б)

На рис. 2 показана зависимость теплопроводности от температуры для направления [111]. Считая, что групповая скорость и длина свободного пробега фононов не зависит от частоты (приближенно), тогда теплопроводность определяется как площадь под кривыми зависимости изохорной теплоемкости от частоты.

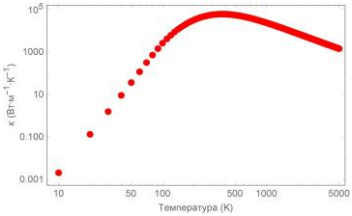


Рис. 2. Теплопроводность алмаза в зависимости от температуры

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2024-0018, госзадание ВлГУ).

Список литературы

1. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике: Физика сплошных сред. М.: Мир. 1966.

2. Aggarwal K.G. // Proceedings of the Physical Society. 1967. V. 91(2). P. 381.

3. Stackhouse S., Stixrude L. // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2010. V. 71 (1). P. 253-269.

4. Ward A., Broido D.A., Stewart D.A., Deinzer G. // Physical Review B – Condensed Matter and Materials Physics. 2009. V. 80 (12). P. 125203.

5. Kazan M., Volz S. // Journal of Applied Physics. 2014. V. 115 (7).

УДК 535(06)+004(06)

Э.С. СЕКТАРОВ[1,2], М.А. КНЯЗЕВА[2,3], И.Ю. ЕРЕМЧЕВ[1,3]
[1]*Институт спектроскопии РАН, Троицк*
[2]*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва*
[3]*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИ СТИМУЛИРОВАННОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В АЛМАЗЕ С АЗОТНЫМИ ЦЕНТРАМИ ОКРАСКИ

В работе представлены данные по исследованию оптически стимулированной люминесценции в алмазе с азотными (NV) центрами окраски. В ходе экспериментов были получены спектры поглощения и фотолюминесценции, графики оптически стимулированной люминесценции и временные зависимости. Полученные результаты показали, что в алмазе с центрами окраски существует эффект оптически стимулированной люминесценции, обусловленный наличием ловушечных состояний в запрещённой зоне.

E.S. SEKTAROV[1,2], M.A. KNIAZEVA[2,3], I.Yu. EREMCHEV[1,3]
[1]*Institute of Spectroscopy of the RAS, Troitsk*
[2]*National Research University Higher School of Economics, Moscow*
[3]*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

STUDY OF OPTICALLY STIMULATED LUMINESCENCE IN DIAMOND WITH NITROGEN COLOR CENTERS

The paper presents the research of optically stimulated luminescence in diamond with nitrogen (NV) color centers. Absorption and photoluminescence spectra, optically stimulated luminescence and time dependencies were obtained during the experiments. The results showed that in diamond with color centers, there is an effect of optically stimulated luminescence caused by the presence of trap states in the forbidden zone.

Центры окраски в алмазах используются в различных областях науки и могут применяться в оптической квантовой памяти, квантовой сенсорике, лазерах, квантовой криптографии и биофотонике [1]. Изучение центров окраски представляет как фундаментальный, так и прикладной интерес. Помимо центров окраски в алмазе содержатся ловушечные состояния, которые могут накапливать в себе электроны с последующим их высвобождением под воздействием дополнительного излучения. Цель работы – экспериментальное исследование ловушечных состояния в алмазе с центрами окраски.

В работе исследован алмаз, выращенный методом осаждения из газовой фазы с примесями азота. Алмаз исследовался методами поглощения, фотолюминесценции и фотостимулированной люминесценции, Спектры поглощения и фотолюминесценции получены на фурье-спектрометре высокого разрешения Bruker IFS125HR при температуре T = 5 K. Разрешение спектров 1 $см^{-1}$.

Для возбуждения на длинах волн 400 и 760 нм использовался фемтосекундный параметрический генератор TOPOL (Avesta), оснащённый электрооптическим модулятором для прореживания частоты следования лазерных импульсов. Фокусировка лазерного излучения в дифракционно-ограниченное пятно, а также сбор флуоресцентного сигнала осуществлялись с помощью иммерсионного микрообъектива Nikon 100x, 1.49 NA. Люминесцентный сигнал измерялся в режиме счёта одиночных фотонов с помощью лавинного фотодиода (MicroPhotonDevices) и многоканальной электронной схемы для коррелированного счёта фотонов TimeTagger (Swabian Instruments).

В ходе экспериментов получены спектры поглощения и фотолюминесценции алмаза. Спектры поглощения были получены в диапазоне от 22000 до 200 $см^{-1}$ (450 нм – 50 мкм), фотолюминесценция регистрировалась в диапазоне от 22000 до 4000 $см^{-1}$ (450 нм – 2,5 мкм). Обнаружены линии NV-центров и линии других дефектов в кристаллической решётке алмаза. При помощи спектров поглощения были оценены концентрации азотных центров окраски в алмазе. Не было обнаружено линий поглощений ловушечных состояний в дальней инфракрасной области, что может указывать на то, что в алмазе содержатся глубоко лежачие ловушки. Также были получены зависимости кинетики затухания оптически стимулированной люминесценции в алмазе. Определено, что электроны в ловушках могут находиться до одного месяца и больше при комнатной температуре.

Продемонстрирован эффект оптически стимулированной люминесценции в алмазе с азотными центрами окраски. Данный эффект даёт возможность создания на базе алмаза устройств для регистрации излучения и оптической квантовой памяти.

Список литературы

1. Rodgers L.V.H., Hughes L.B., et. al. // MRS Bulletin. 2021. V. 46. P. 623-633.

И.А. ЗАХАРЧУК[1,2], М.И. ДАНИЛКИН[2], Н.И. ВОЛЫНЕЦ[1],
П.А. САФИУЛЛИНА[1], А.В. ОСАДЧЕНКО[1,2,5],
С.А. АМБРОЗЕВИЧ[1,2], Д.С. ДАЙБАГЕ[1,2,4], Д.М. БЕЗВЕРХНЯЯ[3],
А.С. СЕЛЮКОВ[1,2,4,5]

[1]Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
[2]Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва
[3]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
[4]Московский политехнический университет
[5]Всероссийский институт научной и технической информации РАН, Москва

ЛЕГИРОВАНИЕ ТЕРБИЕМ ТЕТРАБОРАТА МАГНИЯ С ЦЕЛЬЮ СОЗДАНИЯ ОПТИЧЕСКИ СТИМУЛИРУЕМЫХ ДЕТЕКТОРОВ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Были изучены детекторы ионизирующего излучения, изготовленные из тетрабората магния, легированные диспрозием и натрием (MgB_4O_7: Dy, Na). Исследована возможность оптической стимуляции образцов, в результате чего обнаружен эффект стирания дозовой информации без регистрируемого сигнала, фотолюминесценция на характерных длинах волн возбуждения Dy^{3+} не обнаружена. Установлено, что в зарядовом состоянии 3+ в основе MgB_4O_7 может оказаться Tb^{3+}. Синтезирован образец MgB_4O_7: Tb, Li, наличие Tb^{3+} подтверждено спектральными методами.

I.A. ZAKHARCHUK[1,2], M.I. DANILKIN[2], N.I. VOLYNETS[1],
P.A. SAFIULLINA[1], A.V. OSADCHENKO[1,2,5],
S.A. AMBROZEVICH[1,2], D.S. DAIBAGYA[1,2,4],
D.M. BEZVERKHNYAYA[3], A.S. SELYUKOV[1,2,4,5]

[1]Bauman Moscow State Technical University
[2]Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow
[3]National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
[4]Moscow Polytechnic University
[5]Russian Institute for Scientific and Technical Information of the RAS, Moscow

TERBIUM DOPING OF MAGNESIUM TETRABORATE TO CREATE OPTICALLY STIMULATED IONIZING RADIATION DETECTORS

Ionizing radiation detectors based on magnesium tetraborate doped with dysprosium and sodium (MgB_4O_7: Dy, Na) were studied. The possibility of optical stimulation of the samples was investigated, revealing an erasure effect of dose information without a

detectable signal, and photoluminescence at characteristic Dy^{3+} excitation wavelengths was not observed. It was established that Tb^{3+} ions may be present in the MgB_4O_7 in a 3+ charge state. A sample of MgB_4O_7: Tb, Li was synthesized, and the presence of Tb^{3+} ions was confirmed using spectral methods.

Бораты щелочных металлов нашли своё применение в области дозиметрии ионизирующих излучений [1]. На их основе изготавливаются тканеэквивалентные термолюминесцентные детекторы, способные реагировать на облучение также, как и человеческие ткани. В настоящее время считывание детекторов происходит при подведении тепла. Переход к оптической стимуляции позволит значительно упростить процесс считывания и обеспечить применение таких материалов даже в условиях космических полётов.

При измерении спектров фотолюминесценции MgB_4O_7: Dy, Na образцов на характерных для Dy^{3+} длинах волн 365, 386 и 454 нм свечение зарегистрировано не было. Однако, при предварительном облучении образца ионизирующим излучением и последующей термической стимуляции были получены кривые термически стимулированной люминесценции с двумя характерными для материала максимумами. Проверка оптически стимулированной люминесценции при возбуждении тремя светодиодами с длинами волн 365, 395 и 470 нм показала отсутствие регистрируемого сигнала.

В результате анализа теоретических моделей было решено изготовить новые детекторы ионизирующих излучений на основе тетрабората магния. В качестве примеси был выбран тербий (Tb), которой оказался в зарядовом состоянии 3+ после внесения его в матрицу тетрабората [2]. При возбуждении на 550 нм были получены характерные линии свечения Tb^{3+}. Кривые термовысвечивания образца имеют единственный максимум в области 510 К. Зарегистрированный спектр фотолюминесценции делает тетраборат магния, легированный тербием и литием, потенциально пригодным для оптической стимуляции.

Список литературы

1. Zakharchuk I.A., et al. // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2024. V. 24 (3). P. 431-437.

2. Dorenbos P. // Journal of Luminescence. 2000. V. 91 (3-4). P. 155-176.

УДК 535(06)+004(06)

С.К. ЛЕБЕНКОВА, Л.Д. МИЛЬШИНА
Брянский государственный университет им. И.Г. Петровского

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ СУЩЕСТВОВАНИЯ ТВЁРДОГО РАСТВОРА НА ОСНОВЕ ВОЛЬФРАМАТОВ СТРОНЦИЯ, БАРИЯ С ЗАМЕЩЕНИЕМ Er И Yb

Приведены результаты твердофазного синтеза соединений состава $Ba_xSr_{1-x}WO_4$ (x = 0,25; 0,5; 0,75 мол.%), легированных редкоземельными элементами (РЗЭ). Проведён рентгенофазовый анализ. В результате обработки рентгенограмм по методу Ритвельда были получены параметры элементарной ячейки кристаллической решётки образцов.

S.K. LEBENKOVA, L.D. MILSHINA
Bryansk State University named after I.G. Petrovsky

DEFINITION OF THE AREA OF EXISTENCE SOLID SOLUTION BASED ON STRONTIUM, BARIUM TUNGSTATES WITH Er AND Yb SUBSTITUTION

The results of solid-phase synthesis of compounds of the composition $Ba_xSr_{1-x}WO_4$ (x = 0.25; 0.5; 0.75 mol %) doped with rare earth elements (REE). An X-ray phase analysis was performed. As a result of X-ray processing using the Rietveld method, the parameters of the unit cell of the crystal lattice of the samples were obtained.

Соединения с общей формулой ABO_4, где валентность A меньше валентности B, имеют общий тип структуры шеелита и представлены молибдатами, вольфраматами и периодатами [1]. Эти материалы обладают важными характеристиками и имеют потенциальные технологические применения в различных областях, таких как люминесценция, микроволновая техника, оптические волокна [2], сцинтилляторные материалы [3], датчики влажности, катализаторы, электроды и электролиты [4]. Возможность замещения катионов в структуре вольфрамата как изовалентными, так и гетеровалентными катионами открывает широкие перспективы для модификации свойств материалов, основанных на этих соединениях.

Соединения на основе вольфрама, состава MWO_4 (M = Ca, Sr, Ba), являются перспективными матрицами для преобразования электромагнитного излучения [5].

Вольфраматы, содержащие щёлочно-земельные и редкоземельные элементы, обладая низким коэффициентом термического расширения, высокой химической и термической устойчивостью, находят широкое применение как up- и down-конверсионные материалы.

Целью работы является определение области существования твёрдых растворов гетеровалентных вольфраматов с кристаллической решёткой, соответствующей структуре шеелита.

Было установлено, что структура полученных образцов состава $Ba_xSr_{1-x}WO_4$ (x = 0,25 мол.%), легированных Er и Yb, формируется на основе $SrWO_4$, кристаллизующегося в тетрагональной сингонии (пр. гр. I $4_1/a$). Для системы $Ba_xSr_{1-x}WO_4$ (x = 0,75 мол.%), легированных РЗЭ, характерна кристаллизация в тетрагональной сингонии на основе вольфрамата бария (пр. гр. I $4_1/a$). Для образцов состава $Ba_xSr_{1-x}WO_4$ (x = 0,5 мол.%) характерна кристаллизация в шеелитоподобную структуру с пространственной группой I $4_1/a$. Примесные фазы отсутствуют.

В результате обработки экспериментально полученных рентгенограмм по методу Ритвельда были получены параметры элементарной ячейки кристаллической решётки образцов $Ba_xSr_{1-x}WO_4$ (x = 0,25; 0,50; 0,75 мол.%), активированных Er/Yb с содержанием 1:1, 1:3, 3:1 мол.% соответственно, с минимальным отклонением от теоретических данных.

Построенные графики зависимости мольной доли вольфрамата бария ($BaWO_4$) от значений параметров кристаллической решётки подчиняются правилу Вегарда, что подтверждает получение твёрдого раствора и отсутствие примесных фаз [6].

Список литературы

1. Li H., Zhou S. The relationship between the thermal expansions and structures of ABO_4 oxides // Solid State Chem. 2007. V. 180. P. 589-595.

2. Ahmed N., Kraus H., Kim J. Characterisation of tungstate and molybdate crystals ABO_4 (A = Ca, Sr, Zn, Cd; B = W, Mo) for luminescence lifetime cryothermometry // 2018. V. 4. P. 287-296.

3. Spassky D., Mikhailin V., Nazarov M. Luminescence and energy transfer mechanisms in $CaWO_4$ single crystals // Materials Science and Engineering. 2012. V. 132. P. 2753-2762.

4. Thangadurai V., Knittlmayer C., Weppner W. Metathetic room temperature preparation and characterization of scheelite-type ABO_4 (A = Ca, Sr, Ba, Pb; B = Mo, W) powders // Materials Science and Engineering. 2004. V. 106. P. 228-233.

5. Monkawaa A., Gessei T., Takimoto Y., Nobuaki J., Toshiaki W., Nobuyuki Highly sensitive and rapid gas biosensor for formaldehyde based on an enzymatic cycling system // Sensors and Actuators B: Chemical. 2015. P. 241-247.

6. Горбунов А.А., Юровских А.С. Оценка точности определения содержания кристаллических фаз методом Ритвельда. Екатеринбург: Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина. 2016. С. 282-286.

УДК 535(06)+004(06)

Л.Д. МИЛЬШИНА, С.К. ЛЕБЕНКОВА
Брянский государственный университет им. И.Г. Петровского

СИНТЕЗ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ СУЩЕСТВОВАНИЯ ТВЁРДЫХ РАСТВОРОВ НА ОСНОВЕ ВОЛЬФРАМАТОВ СТРОНЦИЯ И КАЛЬЦИЯ

В работе представлены результаты твердофазного синтеза соединений состава $Sr_{1-x}Ca_xWO_4$ (x = 0,01; 0,03; 0,05; 0,07; 0,10 мол.%). Проведён рентгенофазовый анализ полученных соединений. Выявлено, что область существования приготовленных однофазных соединений состава $Sr_{1-x}Ca_xWO_4$ ограничена значением 3 мол.%.

L.D. MILSHINA, S.K. LEBENKOVA
Bryansk State University named after I.G. Petrovsky

SYNTHESIS AND DETERMINATION OF THE REGION OF EXISTENCE OF SOLID SOLUTIONS BASED ON STRONTIUM AND CALCIUM TUNGSTATES

The paper presents the results of solid-phase synthesis of compounds of the composition $Sr_{1-x}Ca_xWO_4$ (x = 0,01; 0,03; 0,05; 0,07; 0,10 mol %). An X-ray phase analysis of the obtained compounds was carried out. It was revealed that the region of existence of prepared single-phase compounds of the composition $Sr_{1-x}Ca_xWO_4$ is limited to a value of 3 mol %.

Вольфраматы кальция и стронция используются как собственные люминесцентные материалы при производстве рентгеновских экранов, электронно-лучевых трубок, люминесцентных ламп, оптических датчиков [1, 2]. Твёрдые растворы вольфраматов стронция и кальция являются малоизученными в виду узкой области их образования. В связи с этим разработка рациональных способов получения этих фаз, дающих возможность их синтеза в высокочистом и высокодисперсном состоянии с высоким выходом основного продукта процесса, представляет научный и практический интерес [2].

На рис. 1 и 2 представлены результаты рентгенофазового анализа после первого и второго процесса прокаливания образцов.

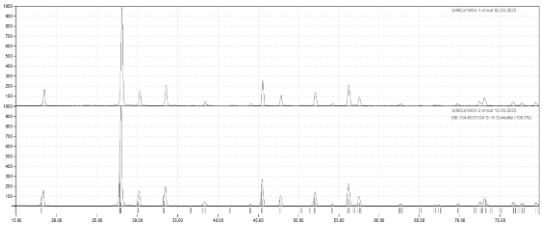


Рис. 1. Рентгеновские дифракционные спектры твёрдого раствора $Sr_{1-x}Ca_xWO_4$ (x = 0,01 мол.%)

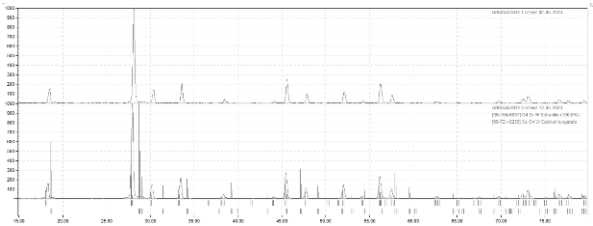


Рис. 2. Рентгеновские дифракционные спектры твёрдого раствора $Sr_{1-x}Ca_xWO_4$ (x = 0,05 мол.%)

Однофазное соединение $Sr_{1-x}Ca_xWO_4$ (x = 0,01 мол.%) с тетрагональной структурой было получено после второго прокаливания. Отсутствуют дифракционные пики, соответствующие исходным соединениям или другим фазам. Аналогичная ситуация наблюдается для системы $Sr_{1-x}Ca_xWO_4$ (x = 0,03 мол.%).

Для соединения состава $Sr_{1-x}Ca_xWO_4$ (x = 0,05 мол.%) после двух процессов спекания характерно наличие двух фаз с тетрагональной решёткой $SrWO_4$ и $CaWO_4$. Аналогичную ситуацию можно проследить для систем $Sr_{1-x}Ca_xWO_4$ (x = 0,07 мол.%), $Sr_{1-x}Ca_xWO_4$ (x = 0,10 мол.%).

Таким образом, при более высоком содержании кальция в системе формируются двухфазные образцы.

Список литературы

1. Шурдумова З.В., Кармоков А.М., Хакулов З.Л., Кодзоков Х.А. Синтез высокочистых и высокодисперсных люминофоров вольфраматов кальция, стронция, бария и их твердых растворов с соответствующими молибдатами в расплавах систем Na, Ca (Sr, Ba)||NO_3, WO_4 и Na, Ca (Sr, Ba)||NO_3, WO_4 // Журнал люминесценции. 2012. № 26. С. 165-169.

2. Spassky D.R, Mikhailin V., Nazarov M., Ahmad-Fauzi M.N. Luminescence and energy transfer mechanisms in $CaWO_4$ // Materials Science and Engineering. 2012. V. 132. No. 10. P. 2753-2763.

УДК 535(06)+004(06)

Е.А. МИХАРЕВ[1], А.Ю. ЛУНЁВ[1], А.И. СИДОРОВ[1,2],
П.А. КОСТИН[1]
[1]*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*
[2]*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В РЕЗОНАТОРАХ МШГ С МОЛЕКУЛЯКУЛЯРНЫМИ КЛАСТЕРАМИ СЕРЕБРА

Работа посвящена разработке экспериментальной установки для исследования нелинейных оптических эффектов для усиления сигналов в сферических микрорезонаторах и анализу возможностей применения мод шепчущей галереи (МШГ) в фотонике. Разработаны экспериментальные установки для изучения усиления в стекле с молекулярными кластерами серебра и возбуждения МШГ в микросферических резонаторах.

E.A. MIKHAREV [1], A.Yu. LUNEV[1], A.I. SIDOROV[1,2], P.A. KOSTIN[1]
[1] *Saint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI»*
[2]*ITMO University, Saint-Petersburg*

DEVELOPMENT OF AN EXPERIMENTAL INSTALLATION FOR MEASUREMENT OF OPTICAL CHARACTERISTICS IN WGM CAVITIES WITH MOLECULAR SILVER CLUSTERS

The work is devoted to the development of an experimental setup for studying nonlinear optical effects for amplifying signals in single-mode fibers and analyzing the possibilities of using whispering gallery modes (WGMs) in photonics. Experimental setups have been developed to study the gain in glass with molecular silver clusters and the excitation of WGMs in microspherical resonators.

Основные механизмы работы сенсоров на основе микрорезонаторов мод шепчущей галереи (МШГ) включают измерение сдвига резонансной частоты, уширения линий потерь и расщепления мод [1]. Эти свойства делают их перспективными для применения в сенсорике и телекоммуникациях.

Основной задачей исследования является разработка экспериментальных установок для изучения усиления оптических сигналов в стекле с молекулярными кластерами серебра, а также для

возбуждения и изучения мод шепчущей галереи в микросферических резонаторах. Молекулярные кластеры серебра имеют линии люминесценции на длинах волн 616 и 752 нм [2].

Для изучения усиления в стекле с молекулярными кластерами серебра разработана установка методом «зонд-накачка» с использованием лазерных УФ-диодов [3]. Конструкция позволяет точно измерять изменения интенсивности сигнала благодаря интеграции узкополосных фильтров и детектора на основе интегрирующей сферы. Вторая часть работы включает создание стенда для возбуждения мод МШГ, где используются призмы и растянутое волокно [4]. Стенд оснащен системой точного позиционирования, обеспечивающей воспроизводимость экспериментов.

В результате исследования были разработаны две экспериментальные установки. Установка для измерения усиления в стекле с молекулярными кластерами серебра (рис. 1) оснащена лазерными УФ-диодами (365 - 410 нм), узкополосными фильтрами (532 и 550 нм) и интегрирующей сферой, обеспечивая точные и стабильные измерения. Стенд для возбуждения МШГ (рис. 2) оснащён системой позиционирования микросфер и волокон с двух- и трёхосевыми трансляторами, что обеспечивает воспроизводимость экспериментов и гибкость настройки.

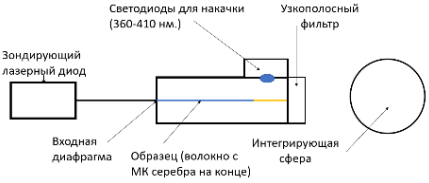


Рис. 1. Схема эксперимента по измерению усиления

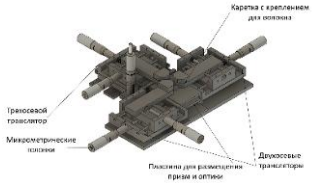


Рис. 2. CAD-модель экспериментального стенда

Список литературы

1. Ораевский А.Н. Волны шепчущей галереи // Квантовая электроника. 2002. Т. 32. № 5. С. 377-400.

2. Демичев И.А. Игнатьев А.И., Сгибнев Е.М., Никоноров Н.В., Сидоров А.И., Хрущева Т.А., Шахвердов Т.А. Особенности люминесценции силикатных стекол с серебром, введенным методом ионного обмена. // Опт. и спектр. 2014. Т. 116. № 4. С. 631-637.

3. Gozhyk I., et al. Gain properties of dye-doped polymer thin films // Physical Review B. 2015. V. 92. No. 21. P. 214202.

4. Galkin N.K., Golov N.A., Yurasova I.I. Laser technologies and whispering-gallery-mode resonators // J. Radioelectronics. 2022. V. 7.

УДК 535(06)+004(06)

А.Ю. ЛУНЁВ[1], Е.А. МИХАРЕВ[1], А.И. СИДОРОВ[1,2], П.А. КОСТИН[1]
[1]*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*
[2]*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

РАСЧЁТ СПЕКТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ МИКРОСФЕРИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА ИЗ ФОСФАТНОГО СТЕКЛА ЛЕГИРОВАННОГО Er^{3+}

Работа посвящена расчёту спектров излучения микросферического резонатора с модами шепчущей галереи, изготовленного из фосфатного стекла, легированного ионами эрбия. Проведены расчёты спектров излучения и подобраны оптимальные параметры расположения тейпированного волокна для ввода излучения накачки и вывода сигнала люминесценции ионов эрбия.

A.Yu. LUNEV[1], E.A. MIKHAREV [1], A.I. SIDOROV[1,2], P.A. KOSTIN[1]
[1] *Saint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI»*
[2]*ITMO University, Saint-Petersburg*

CALCULATION OF RADIATION SPECTRA OF A PHOSPHATE GLASS MICROSPHERIC RESONATOR DOPED WITH Er^{3+}

The work is devoted to the calculation of the emission spectra of a microspherical resonator with whispering gallery modes, made of phosphate glass doped with erbium ions. Calculations of emission spectra were carried out and optimal parameters for the location of the taped fiber were selected for inputting pump radiation and outputting the luminescence signal of erbium ions.

Основной задачей исследования является численный расчёт спектров излучения ионов эрбия в микросферическом резонаторе при возбуждении мод шепчущей галереи в резонаторе и исследование влияния положения тейпированного волокна на согласование мод резонатора и накачки.

Расчёт спектров согласования излучения накачки и люминесценции из волокна в микрорезонатор при изменении параметров тейпированного волокна был выполнен с применением метода конечных элементов [1]. На рис. 1 представлена расчётная геометрия и распределение поля для одной из возбуждённых мод шепчущей галереи на длине волны 1560 нм. Расчётная область представляла собой отрезок тейпированного волокна [2] и расположенную рядом с ним микросферу из исследуемого стекла.

Центральная часть сферы не была включена расчётную область для сокращения времени вычислений. Также расчётная область включала в себя небольшой участок воздуха вокруг волокна и резонатора для подавления нежелательных отражений от границ [3]. Как видно из рис. 1, моды, возбуждаемые таким образом, оказываются возмущены за счёт взаимодействия с волокном и имеют меньшую добротность, чем у изолированной микросферы. На рис. 2 представлен расчётный спектр излучения резонатора при накачке на длине волны 975 нм. Пики в спектре соответствуют фундаментальным модам резонатора, для которых добротность и согласование с модами накачки оказались наибольшими. Межмодовое расстояния составляет порядка 2.12 ТГц для микросферы радиусом 15 мкм.

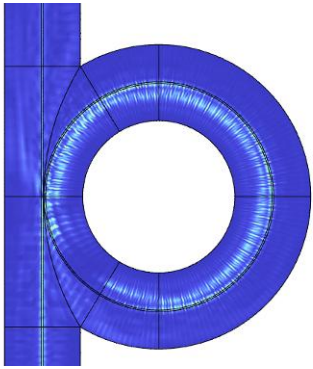


Рис. 1. Расчётная область для метода конечных элементов и распределение поля для возбуждённой моды

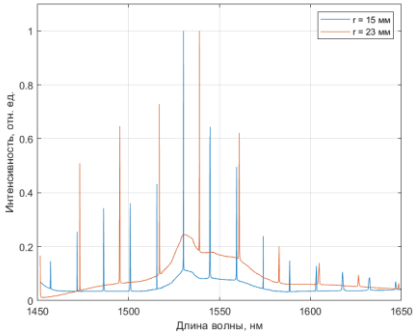


Рис. 2. Расчётные спектры люминесценции микрорезонатора из фосфатного стекла, легированного ионами эрбия

Список литературы

1. Chen L., et al. Simulating robust far-field coupling to traveling waves in large three-dimensional nanostructured high-Q microresonators // Photonics Research. 2019. V. 7. No. 9. P. 967-976.

2. Ge K., et al. Dynamic manipulation of WGM lasing by tailoring the coupling strength // Optics Express. 2022. V. 30. No. 16. P. 28752-28761.

3. Liu G.R., Jerry S.S.Q. A non-reflecting boundary for analyzing wave propagation using the finite element method // Finite elements in analysis and design. 2003. V. 39. No. 5-6. P. 403-417.

УДК 535(06)+004(06)

О.П. БАРИНОВА, Д.Д. КНЯЗЬКИН, К.И. РУНИНА
Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва

СИНТЕЗ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЛЮМИНАТОВ ЛИТИЯ СОСТАВА $LiAlO_2$ и $LiAl_5O_8$

Получены методом твердофазного синтеза при 950 и 1200 °С алюминаты лития составов $LiAlO_2$ (тетрагональная сингония, пространственная группа $P4_12_12$) и $LiAl_5O_8$ (кубическая сингония, пространственная группа $P4_332$) соответственно. При исследовании спектров установлена высокая отражательная способность алюминатов.

O.P. BARINOVA, D.D. KNYAZKIN, K.I. RUNINA
Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow

SYNTHESIS AND SPECTRAL CHARACTERISTICS OF LITHIUM ALUMINATES STRUCTURED AS $LiAlO_2$ AND $LiAl_5O_8$

Lithium aluminates of the compositions $LiAlO_2$ (tetragonal system, space group $P4_12_12$) and $LiAl_5O_8$ (cubic system, space group $P4_332$) were obtained by solid-phase synthesis at 950 and 1200 °C, respectively. When studying the spectra, the high reflectivity of aluminates was established.

Алюминаты лития различных составов представляют интерес в качестве матриц для люминофоров красного цвета [1, 2], материалов радиационной дозиметрии [3]. Авторами работ [1, 2] получен моноалюминат лития $LiAlO_2$, легированный ионами Mn^{4+}, и исследованы его люминесцентные свойства. В работе [3] исследован моноалюминат лития в качестве перспективного материала для радиационной дозиметрии. Исследования спектральных характеристик пентаалюмината лития ($LiAl_5O_8$) не проводили.

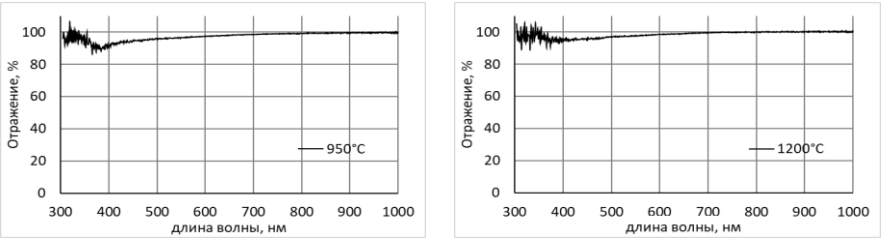
Целью настоящей работы являлся синтез и исследование спектров диффузного отражения моноалюмината лития (γ-$LiAlO_2$) и пентаалюмината лития ($LiAl_5O_8$) как перспективных матриц для материалов радиационной дозиметрии и люминофоров.

Алюминаты лития синтезировали методом твердофазного спекания при температурах 950 и 1200 °С. Исходными реактивами служили: гидроксид лития моногидрат ($LiOH*1H_2O$, «ч», ГОСТ 8595-83) и оксид алюминия (Al_2O_3, «чда», ТУ 6-09-426-75). Фазовый состав определяли

методом РФА (дифрактометр InelEquinox 2000, детектор CPS 180); спектры диффузного отражения исследовали на спектрофотометрическом комплексе «Ocean Optics (UV/VIS)» в диапазоне 300 - 1100 нм.

При синтезе получены кристаллические порошки белого цвета. Методом РФА в работе установлено, что при 950 °С формируется преимущественно высокотемпературная модификация моноалюмината лития γ-$LiAlO_2$, имеющая тетрагональную сингонии и пространственную группу $P4_12_12$. При 1200 °С преимущественно формируется (> 95 %) фаза, соответствующая пентаалюминату лития $LiAl_5O_8$, имеющая кубическую сингонию и пространственную группу $P4_332$, а также незначительное количество γ-$LiAlO_2$ (< 5 %).

Исследование спектров диффузного отражения алюминатов лития γ-$LiAlO_2$ (рис. 1*а*) и $LiAl_5O_8$ (рис. 1*б*) в диапазоне 300 - 1000 нм показали высокую отражательную способность (95 - 98 %) синтезированных соединений во всем исследуемом диапазоне.



а *б*

Рис. 1. Спектры диффузного отражения моноалюмината лития γ-$LiAlO_2$ (*а*) и пентаалюмината лития $LiAl_5O_8$ (*б*)

Таким образом, определены условия синтеза перспективных матриц γ-$LiAlO_2$ и пентаалюмината лития $LiAl_5O_8$; получены их спектры диффузного отражения.

Список литературы

1. Aoyama M., et al. Synthesis and characterization of Mn-activated lithium aluminate red phosphors //Journal of luminescence. 2013. V. 136. P. 411-414.

2. Du J., Poelman D. Energy efficient microwave-assisted preparation of deep red/near-infrared emitting lithium aluminate and gallate phosphors // Journal of Luminescence. 2021. V. 237. P. 118168.

3. Van Giap T., Thanh N.T. Synthesis of lithium aluminate for application in radiation dosimetry // Materials Letters. 2020. V. 267. P. 127506.

УДК 535(06)+004(06)

Л.Г. САМСОНОВА, Р.М. ГАДИРОВ, Н.А. КАЗИН[1],
Г.Л. РУСИНОВ[1]
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
[1]Институт органического синтеза им. И.Я. Постовского УрО РАН,
Екатериинбург

ФОТОГЕНЕРАТОРЫ КИСЛОТЫ НА ОСНОВЕ ЗАМЕЩЁННЫХ БЕНЗО(b)ТИОФЕН-2-КАРБОКСАМИДОВ

Приведены результаты фотолиза толуольных растворов замещённых бензо(b)тиофен-2-карбоксамидов под действием излучения третьей гармоники Nd-YAG лазера с целью образования кислоты как продукта фотопревращений.

L.G. SAMSONOVA, R.M. GADIROV, N.A. KAZIN[1], G.L. RUSINOV[1]
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronicsk
[1]Postovsky Institute of Organic Synthesis of Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg

PHOTOACID GENERATION FROM SUBSTITUTED BENZO(b)THIOPHEN-2-CARBOXAMIDE

The results of photolysis of substituted benzo(b)thiophene-2-carboxamides toluene solutions under the action of 3rd harmonic of a Nd-YAG laser with the aim of forming acid as a product of phototransformations are presented.

Фотохимические генераторы кислоты (ФГК) – это соединения под действием света разлагающиеся с образованием кислот. ФГК являются ключевым материалом в микролитографии, катионной фотополимеризации, всё более широкое распространение находят в биологии [1].

В настоящей работе соединения A1, A2, A3 являются кандидатами образования кислоты (рис. 1). Соединение In использовано в качестве индикатора кислотности раствора. Предварительно проведено титрование In трихлоруксусной кислотой в толуоле и построена зависимость оптической плотности протонированной формы In на 530 нм от концентрации кислоты.

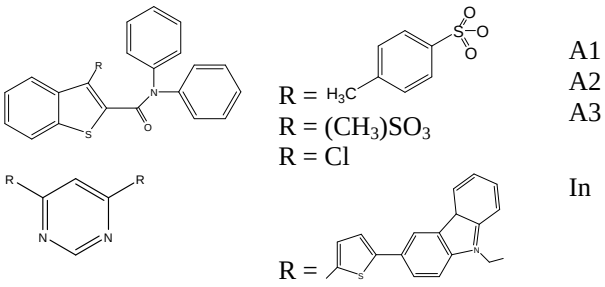


Рис. 1. Используемые в работе вещества

Толуольные растворы соединений A1-A3 концентрации 10^{-4} М облучались в течение четырёх минут третьей гармоникой Nd-YAG-лазера (355 нм), частотой 1 Гц, W ~ 0.24 Дж/см^2. К облучённым растворам добавлялся In концентрации 10^{-5} М. Окрашивание раствора в малиновый цвет, характерный для протонированной формы In, служило доказательством внутримолекулярного фотохимического превращения соединений с образованием кислоты. По оптической плотности на длине волны 530 нм, пользуясь кривой титрования In, оценивалась концентрация образовавшейся кислоты. Следует сказать, что из исследованных соединений образование кислоты наблюдалось только для A1 и A2. Наиболее вероятным механизмом является внутримолекулярная циклизация с отрывом фрагмента R и атома водорода от фенильного кольца с образование кислоты RH [2].

Исследование выполнено в рамках госзадания № FEWM-2024-0001.

Список литературы

1. Кузнецова Н.А., Малков Г.В., Грибов Б.Г. // Успехи химии. 2020. Т. 89 (2). С. 1973-190.
2. Sarker M., Shahrin T., Steinmetz M.G. // Jrganic Letters. 2011. V. 13. No. 5. P. 872-875.

УДК 535(06)+004(06)

М.А. ГОРЯЕВ
Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург

КИНЕТИКА СЕНСИБИЛИЗИРОВАННЫХ КРАСИТЕЛЕМ ФОТОПРОЦЕССОВ В КРЕМНИИ *n*- И *p*-ТИПА

Исследована кинетика фотоЭДС в кремнии *n*- и *p*-типа с нанесённым на поверхность красителем. В полупроводнике *n*-типа наблюдается монотонное возрастание фотоэффекта, а в образцах *p*-типа при нанесении красителя сначала происходит рост фотоэффекта, а затем фотоЭДС уменьшается вследствие десенсибилизирующего действия красителя.

M.A. GORYAEV
Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint-Petersburg

KINETICS OF THE DYE SENSITIZED PHOTOPROCESSES IN THE *n*- AND *p*-TYPE SILICON

The photo-EMF kinetcs in the *n*- and *p*-type silicon with a dye applied on the semiconconductor surface are investigated. The monotonous increase of the photovoltaic effect is observed in the *n*-type semiconductor, but in the *p*-type samples after the dye piling up the photovoltaic effect increases at first, but then photo-EMF decreases because of the dye desensitizatoin effect.

В фотоэлектрических преобразователях солнечной энергии [1] и в системах регистрации изображений [2] широко используются кремниевые структуры. В порошкообразном кремнии красители эффективно сенсибилизируют фотопроводимость на постоянном токе [3], но в монокристаллическом кремнии *n*-типа наблюдается спектральная сенсибилизизация фотоЭДС, а в образцах *p*-типа красители оказывают десенсибилизирующее действие на фотоэффект [4 - 6]. В данной работе исследовалась кинетика фотоЭДС в монокристаллических образцах кремния с проводимостью *n*-типа, легированных фосфором с концентрацией 10^{15} см$^{-3}$, и с проводимостью *p*-типа, легированных бором с концентрацией 10^{15} см$^{-3}$, и влияние на фотовольтаический эффект нанесенного на поверхность полупроводника органического красителя.

Измерения фотоЭДС образцов проводилось конденсаторным методом [7] при модулированном освещении. Сигналы ΔU регистрировались самописцем Enregistreur 8205/1 и нормировались на одинаковое

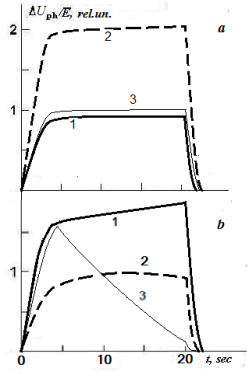


Рис. 1 Кинетические кривые фотоЭДС образцов кремния *n*-типа (*a)* и *p*-типа (*b)*

количество падающих на образец квантов света. На рис. 1 представлены кинетические кривые фотоЭДС образцов кремния *n*-типа (*a)* и *p*-типа (*b)* без красителя (кривые *1*) и после нанесения на полупроводник родамина 6Ж с концентрациями молекул 40 нм$^{-2}$ (кривые *2*) и 70 нм$^{-2}$ (кривые *3*) в полосе поглощения красителя. Исследуемые образцы были однородны, поэтому конденсаторная фотоЭДС имеет диффузионную природу, а её величина и знак определяется разностью подвижностей электронов и дырок. В кремнии подвижность дырок в несколько раз меньше подвижности электронов [8], поэтому основной вклад в изменение фотоЭДС вносят генерированные при передаче энергии от красителя электроны. В исходном кремнии *n*-типа фотоЭДС также обусловлена электронами, поэтому при нанесении красителя наблюдается рост величины ЭДС (рис. 1*a*, кривые *1* и *2*). Затем происходит уменьшение сигнала (кривая *3*), что связано с проявлением фильтрового эффекта в полосе поглощения красителя [3, 4, 9]. Величина фотоЭДС образцов кремния *p*-типа в установившемся режиме убывает в полосе поглощения красителя по мере увеличения его концентрации на поверхности полупроводника (рис. 1*b*, кривые 1 - 3). Дополнительная фотоЭДС при передаче энергии фотовозбуждения от красителя определяется электронами и её полярность противоположна фотоЭДС, обусловленной основными носителями кремния *p*-типа, что приводит к десенсибилизирующему действию красителя: фотоэффект почти полностью исчезает (кривая *3*).

Список литературы

1. Алферов Ж.И., Андреев В.М., Румянцев В.Д. // Физ. и техн. полупроводников. 2004. Т. 38. № 8. С. 937.

2. Горяев М.А., Дудников Ю.А. // ЖНиПФиК. 1990. Т. 35. № 5. С. 386.

3. Горяев М.А. // Ж. физ. химии. 2015. Т. 89. № 12. С. 1940.

4. Goryaev M.A. // Optics and Spectroscopy. 2019. V. 127. № 1. P. 167.

5. Goryaev M.A.,Smirnov A.P., Luzhkov A.A. // Physics Compl. Syst. 2021. V. 2. № 3. P. 110.

6. Горяев М.А. XIII Межд. конф. по фотонике и информац. оптике: сб. научн. тр: М.: НИЯУ МИФИ. 2024. С. 271.

7. Акимов И.А. // Оптико-механ. промышл. 1966. № 5. С. 4.

8. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука,1977.

9. Горяев М.А. // Оптика и спектрокопия. 1980. Т. 49. № 6. С. 1142.

УДК 535(06)+004(06)

С.Н. ДОМАРЕВ, М.А. РИДЕР, А.В. БОЛТЕНКО,
Е.О. МОИСЕЕВА[1], Д.Е. ЦЮРКО[1], А.О. ОРЛОВА
Университет ИТМО, Санкт-Петербург
[1]Сколковский институт науки и технологий

ДИНАМИКА ПРОЦЕССА ФОТОИНДУЦИРОВАННОГО РАСТВОРЕНИЯ СУПЕРПАРАМАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА ЖЕЛЕЗА

Исследованы закономерности фотоиндуцированного растворения суперпарамагнитных наночастиц оксида железа (SPION) в водных растворах. Установлена зависимость эффективности фоторастворения SPION от поглощённой раствором дозы излучения. Изучены тенденции протекания процессов фоторастворения и представлена динамическая картина данного процесса.

S.N. DOMAREV, M.A. RIDER, A.V. BOLTENKO,
E.O. MOISEYEVA[1], D.E. TSYURKO[1], A.O. ORLOVA
ITMO University, Saint-Petersburg
[1]Skolkovo Institute of Science and Technology

DYNAMICS OF PHODODISSOLUTION PROCESS OF THE SUPERPARAMAGNETIC IRON OXIDE NANOPARTICLES

The basic regularities of photodissolution of superparamagnetic iron oxide nanoparticles (SPION) in aqueous solutions are presented. The dependence of the dynamics of the nanoparticles photodissolution process on the radiation dose absorbed by the colloidal solution has been established. Trends of photodissolution processes have been studied and the dynamic picture of this process is presented.

Тераностические лекарственные формы на основе наночастиц оксида железа являются перспективным видом препаратов для диагностики и терапии раковых опухолей [1[. В данном аспекте крайне примечательно свойство таких систем производить релиз ионов железа под действием света видимого диапазона, что может приводить к запуску механизма клеточной гибели, известного как ферроптоз [2, 3]. Целью данной работы является экспериментальное установление зависимости протекания фотоиндуцированного процесса растворения наночастиц оксида железа от поглощённой системой дозы падающего светового излучения.

На рис. 1 приведены характерные спектры магнитного кругового дихроизма (рис. 1а) и оптической плотности (рис. 1б) коллоидного

раствора используемых наночастиц до и после облучения источником светового излучения с максимумом излучения на 445 нм. В применяемой экспериментальной установке (вставка на рис. 1а) энергетическая облучённость в точке расположения образца составляет 130 мВт/см^2.

Было установлено, что процесс фоторастворения в целом характеризуется как пороговый эффект, одним из проявлений которого является снижение сигнала МКД и оптической плотности на длине волны 300 нм (рис. 1). Помимо изменения вышеуказанных сигналов также экспериментально установлено существование релиза ионов железа, подтверждающееся увеличением полосы поглощения комплекса ионов железа с орто-фенантролином. Было установлено, что на эффективность фоторастворения SPION также влияет процесс агрегации, значительно его замедляя. Аппроксимирующая экспериментальные данные функция в этом случае наиболее хорошо описывается зависимостью типа «Двойная доза-эффект» (Double dose-response), физический смысл которой заключён в изменении некоторого показателя в зависимости от поглощённой дозы электромагнитного излучения. При получении системой предельной дозы порядка 100 Дж в водных растворах с pH 4.8 - 5.0 (ацетатный буфер) отмечается ускорение процесса фоторастворения (область 3 на рис. 2). Замедление процесса (область 4 на рис. 2) происходит при поглощённой дозе электромагнитного излучения порядка 200 Дж. При условии избытка молекул стабилизатора (лимонная кислота) наблюдается повышение пороговых доз, что наиболее вероятно связано с быстрой заменой десорбированной молекулы стабилизатора на поверхности МНЧ.

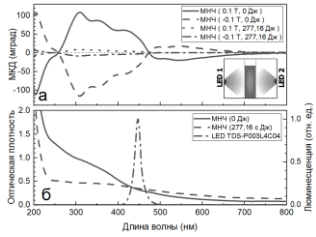


Рис. 1. Спектры образца и источника облучения (на вставке приведена схема облучения)

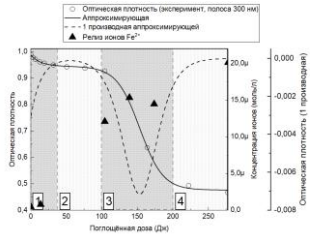


Рис. 2. Корреляция динамики снижения оптической плотности 300 нм с релизом ионов (цифрами указаны основные участки на динамической кривой)

Список литературы

1. De Espindola A., et al. // J. of Magnetism and Magnetic Materials. 2022. V. 545. P. 168751.
2. Li J., et al. // Cell Death Dis. 2020. V. 11. P. 88.
3. Litter M.I., Blesa M.A. // Can. J. Chem. 1992. V. 70. P. 2502.

УДК 535(06)+004(06)

Ю.Д. ЛАНТУХ
Оренбургский государственный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИСХОДНОЙ ФОРМЫ БАКТЕРИОРОДОПСИНА В ПРОЦЕССЕ ОПТИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ

Приведены результаты экспериментов по исследованию временных параметров восстановления исходной формы бактериородопсина (БР) в плёночном материале «Биохром» после обесцвечивания плёнок лазерным излучением. Кинетические кривые процесса релаксации B-формы БР удовлетворительно описываются биэкспоненциальной функцией.

Yu.D. LANTUKH
Orenburg State University

STUDY OF THE KINETICS OF BACTERIORHODOPSIN ORIGINAL FORM REGENERATION DURING OPTICAL RECORDING

The results of experiments on the time parameters study of the bacteriorhodopsin ("Biochrom" film) original form regeneration after bleaching the films with laser radiation are presented. The relaxation process kinetic curves of the B-form of BR are satisfactorily described by the biexponential function.

Физико-химические характеристики бактериального родопсина (БР) всесторонне исследованы [1, 2]. Фотохромные свойства БР могут быть использованы для разработки различного рода практических устройств, в том числе для записи и обработки оптической информации.

В ответ на поглощение кванта света бактериородопсин BR(570) (форма A) обесцвечивается, вступая в цикл фотохимических превращений. При этом происходит изомеризация ретиналя с последующим образованием формы B(412). Этот процесс обратим, и в темноте идет в обратном направлении с полным восстановлением свойств основной формы.

Целью работы являлось экспериментальное исследование временных характеристик темнового процесса восстановления окраски фотохромного материала Биохром на основе бактериородопсина после обесцвечивания лазерным импульсным излучением.

Плёночный образец БР помещался в термостатируемую камеру с прозрачными оптическими окнами. Импульсное обесцвечивание и

непрерывное зондирование образца осуществлялось YAG-Nd лазером с λ = 532 нм [3]. Одна часть пучка излучения лазера мощностью 100 мВт в течение 5 с обесцвечивала образец. Другая часть (1 мВт) просвечивала образец постоянно.

Кинетические кривые $I = f(t)$ восстановления окраски плёнки БР регистрировались прибором FieldMaster GS (Coherent), I – интенсивность пучка зондирующего лазера, прошедшего через образец. Кривые удовлетворительно описываются биэкспоненциальной функцией.

Кинетическая кривая релаксации наведённой оптической плотности ΔD образца, полученная при 30 °С, приведена на рис. 1.

Биэкспоненциальный характер кинетики процесса B → A может совпадать с числом темновых стадий и активных промежуточных продуктов фотоцикла БР в высоковязком состоянии полимерной матрицы, который соответствует нашему случаю. А это может прояснить ситуацию с вовлеченностью возможных интермедиатов в фотоцикл БР.

С повышением температуры скорость релаксации возрастает, что объясняется увеличением скорости темновых реакций восстановления исходной формы белка. На этой основе предложена модель датчика температуры окружающей среды. К преимуществам такого датчика можно отнести: бесконтактность (датчик чисто оптический), компактность, широкий интервал температур и число фотохромных циклов более 10^5.

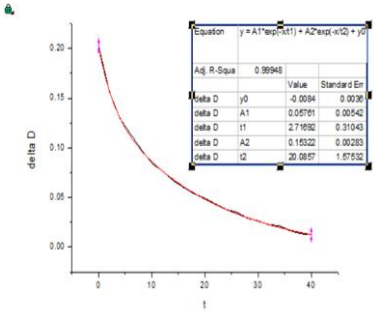


Рис. 1. Кинетическая кривая релаксации оптической плотности

Список литературы

1. Дружко А.Б. Бактериородопсин: фундаментальные аспекты и возможности для практического применения. М.: РАН, 2022.

2. Всеволодов Н.Н. Биопигменты – фоторегистраторы: фотоматериал на бактериородопсине. М.: Наука, 1988.

3. Лантух Ю.Д. Влияние температуры на фотохромные свойства пленок бактериородопсина // Тезисы докладов Конференции ХОЛОЭКСПО 2024. С. 304-305.

УДК 535(06)+004(06)

Д.А. СОКОЛОВА, А.И. СИДОРОВ[1,2], О.А. ПОДСВИРОВ, С.А. ШЕСТАКОВ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
[1]Университет ИТМО, Санкт-Петербург
[2]Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

ЗАПИСЬ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В СЕРЕБРОСОДЕРЖАЩИХ СТЁКЛАХ ЭЛЕКТРОННЫМ ЛУЧОМ

Экспериментально показана возможность записи оптической информации в натриево-силикатные стёкла, покрытые тонкой серебряной плёнкой толщиной 26 нм при помощи электронного пучка с энергией электронов E = 45 кэВ и дозами электронного облучения Q = 30 и 50 млКл/см^2. Эксперименты показали, что в стекле образуются молекулярные кластеры серебра разных размеров и концентрации в зависимости от параметров облучения, которые обладают люминесценцией, но последующая термообработка приводит к гашению люминесценции и формированию наночастиц серебра.

D.A. SOKOLOVA, A.I. SIDOROV[1,2], O.A. PODSVIROV, S.A. SHESTAKOV

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University
[1]ITMO University, Saint-Petersburg
[2]Saint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI»

RECORDING OPTICAL INFORMATION IN SILVER CONTAINING GLASSES WITH AN ELECTRON BEAM

The possibility of recording optical information in sodium silicate glasses coated with a thin silver film 26 nm thick has been experimentally demonstrated using an electron beam with an electron irradiation energy of E = 45 keV and electron irradiation doses of Q = 30 and 50 mlC/cm^2. The experiments have shown that molecular silver clusters of different sizes and concentrations are formed in the glass depending on the irradiation parameters, which have luminescence, but subsequent heat treatment leads to quenching of the luminescence and the formation of silver nanoparticles.

Стёкла в составе с наночастицами металлов имеют большой спектр применения, в частности могут использоваться в качестве среды для записи оптической информации [1 - 3]. Люминесцентные характеристики молекулярных кластеров (МК) и наночастиц благородных металлов

являются предметом детального изучения, обусловленного перспективами применения МК в фотонике, наноэлектронике, сенсорике [4, 5].

Целью работы является экспериментальное исследование возможности записи оптической информации электронным лучом в натриево-силикатные стёкла, покрытые тонкой серебряной плёнкой. Электронное облучение (ЭО) проводилось с помощью сканирующего электронного микроскопа JEBD-2 с энергией электронов E = 45 кэВ. Дозы электронного облучения составляли 30 и 50 млКл/см^2.

Эксперименты показали, что ЭО приводит к увеличению оптической плотности (рис. 1) и формированию нейтральных молекулярных кластеров серебра в приповерхностных слоях стекла. В облучённых областях наблюдается увеличение интенсивности люминесценции по мере увеличения дозы облучения при этом полоса люминесценции сдвигается с 450 до 550 нм (рис. 2).

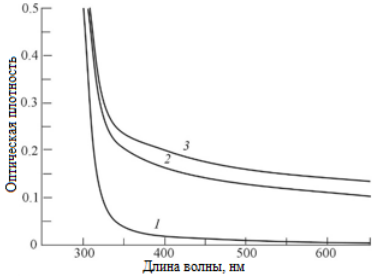


Рис. 1. Спектры оптической плотности образца после ЭО: до ЭО (*1*); ЭО с дозой 30 млКл/см^2 (*2*); ЭО с дозой 50 млКл/см^2 (*3*)

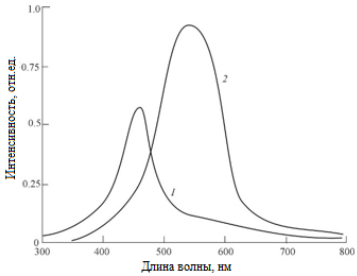


Рис. 2. Спектры люминесценции молекулярных кластеров серебра, длина волны возбуждения 365 нм: ЭО с дозой 30 млКл/см^2 (*1*); ЭО с дозой 50 млКл/см^2 (*2*)

Список литературы

1. Ignatiev A.I., Klyukin D.A., Leontieva V.S., Nikonorov N.V., Shakhverdov T.A., Sidorov A.I. // Opt. Mater. Expr. 2015. V. 5. P. 1635-1646.

2. Taylor A.B., Michaux P., Mohsin A.S.M., Chon J.W.M. // Opt. Express. 2014. V. 22. P. 13234-13243.

3. Bellec M., Royon A., Bousquet B., et al. // Opt. Express. 2009. V. 17. P. 10304-10318.

4. Shang L., Dong S., Nienhaus G.U. // Nano Today. 2011. V. 6. P. 401.

5. Lu Y.Z., Wei W.T., Chen W. // Chin. Sci. Bull. 2012. V. 57. P. 41.

УДК 535(06)+004(06)

Д.А. ГАВРИЛОВА[1,2], М.А. ГАВРИЛОВА[1], С.К. ЕВСТРОПЬЕВ[1,2,3]
[1]*Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)*
[2]*Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург*
[3]*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

ФОТОАКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ СИСТЕМЫ ZnO-$ZnCr_2O_4$ ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ

В работе были исследованы особенности формирования материалов системы ZnO-Cr_2O_3, синтезированных полимерно-солевым методом, а также изучено влияние количественного соотношения компонентов на их фотокаталитические и адсорбционные свойства.

D.A. GAVRILOVA[1,2], M.A. GAVRILOVA[1], S.K. EVSTROPIEV[1,2,3]
[1]*Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*
[2]*S.I. Vavilov State Optical Institute, Saint-Petersburg*
[3]*ITMO University, Saint-Petersburg*

PHOTOACTIVE MATERIALS OF ZnO-$ZnCr_2O_4$ SYSTEM FOR ENVIRONMENTAL APPLICATIONS

The work investigated the features of the formation of materials of the ZnO-Cr_2O_3 system synthesized by the polymer-salt method, and the influence of the quantitative ratio of components on their photocatalytic and adsorption properties.

Текущая мировая экологическая ситуация стимулирует изучение и разработку новых фотокаталитических и бактерицидных материалов, которые могут эффективно применяться для очистки воздуха и воды от органических загрязнителей. Одними из наиболее распространённых фотокатализаторов являются материалы на основе ZnO, поскольку они обладают термической стабильностью, химической стойкостью и могут быть синтезированы различными методами. Однако высокое значение ширины запрещённой зоны ZnO требует использования ультрафиолетового (УФ) излучения, что сокращает возможности их применения [1]. Поэтому в работе было исследовано влияние количества содержания Cr на фотокаталитические свойства системы ZnO-Cr_2O_3 под действием длинноволнового УФ-излучения.

В работе полимерно-солевым методом, описанным в [2], были синтезированы нанокристаллические материалы системы ZnO-Cr_2O_3 с

мольным соотношением Zn:Cr в образцах 90 : 10 и 80 : 20 %. Для этого нитраты металлов в соответствующих соотношениях и поливинилпирролидон (M_r = 30000), использованный в качестве гелеобразователя, растворяли в дистиллированной воде. Смесь высушивали до образования геля и затем прокаливали в течение 2 ч. при температуре 550 °C. По результатам РФА были получены композитные наноматериалы ZnO-$ZnCr_2O_4$ со средними размерами кристаллитов 12 ± 4 нм. Значения ширины запрещённой зоны материалов составили 3.3 эВ из-за высокого содержания ZnO. Снимки СЭМ показали, что полученные образцы имеют развитую мелкодисперсную структуру, формирующуюся вследствие выделения газообразных продуктов реакции горения. По результатам рентгеноспектрального микроанализа элементный аналитический состав композитов соответствует номинальному в пределах погрешности измерений. Фотокаталитические и адсорбционные свойства композитов исследовали в водных суспензиях с использованием красителя Chicago Sky Blue (CSB) в качестве модельного загрязнителя. Изменение концентрации красителя в растворе фиксировали спектрофотометрически в течение 40 мин. Константы скорости адсорбции красителя на поверхности композитов, рассчитанные по кинетической модели первого порядка, составили 0.0724 и 0.0661 $мин^{-1}$ для порошков, с мольным соотношением Zn : Cr = 90 : 10 и 80 : 20 % соответственно. Это соответствует удалению около 10 % красителя из раствора за 40 мин. Для исследования фотокаталитической активности порошков был использован узкополосный диод с максимумом интенсивности излучения при длине волны 395 нм. Кинетику фотокатализа описывали с применением кинетической модели псевдопервого порядка. Значения констант скорости фотокаталитического разложения красителя составили 0.0215 $мин^{-1}$ для образца с соотношением Zn : Cr = 90 : 10 и 0.0618 $мин^{-1}$ для образца с соотношением Zn : Cr = 80 : 20, что соответствует удалению 60 и более 90 % красителя из раствора в течение 40 мин.

Таким образом, в работе показано, что количественное соотношение компонентов способно оказывать значительное влияние на фотокаталитические свойства материалов ZnO-$ZnCr_2O_4$. Полученные ZnO-$ZnCr_2O_4$ фотокатализаторы могут эффективно применяться на границе УФ / видимого излучения.

Список литературы

1. Gavrilova D.A., et al. // Optics and Spectroscopy. 2024. V. 132 (4). P. 143-156.
2. Дукельский К.В., Евстропьев С.К. // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 1. С. 58-64.

УДК 535(06)+004(06)

К.Н. БЕЛОВ[1], А.С. БЕРДНИКОВ[1], В.Б. КИРЕЕВ[2],
Н.Д. КУНДИКОВА[1,3], Е.П. ШЕШИН[2]
[1]Южно-Уральский государственный университет, Челябинск
[2]Московски физико-технически институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный
[3]Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург

КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА ДЛЯ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕНИЯ В УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩИХ КАТОДАХ

Зарегистрированы и исследованы спектры комбинационного рассеяния света катодов, изготовленных из углеродных нанотрубок, полиакрилонитрильных волокон, пиролитического графита и мелкозернистого плотного графита до и после работы в катодолюминесцентной лампе. По значениям частоты линии G определены напряжения сжатия, возникающие в катодах после эксплуатации.

K.N. BELOV[1], A.S. BERDNIKOV[1], V.B. KIREEV[2],
N.D. KUNDIKOVA[1,3], E.P. SHESHIN[2]
[1]South Ural State University, Chelyabinsk
[2]Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny
[3]Institute of Electrophysics of, Ural Branch of the RA S, Yekaterinburg

RAMAN LIGHT SCATTERING FOR STRESS ESTIMATION IN CARBON-CONTAINING CATHODES

Raman spectra of cathodes made of carbon nanotubes, polyacrylonitrile fibers, pyrolytic graphite, and fine-grained dense graphite before and after operation in a cathodoluminescent lamp have been recorded and studied. The values of the G line frequency were used to determine the compressive stresses occurring in the cathodes after operation.

Катодолюминесцентные лампы привлекают значительное внимание благодаря возможности работы в ультрафиолетовой области спектра [1].

Эффективность работы катодолюминесцентных источников излучения зависит от характеристик катода, что определяет необходимость исследования свойств, связанных с деградацией катодов. Цель настоящей работы – оценить напряжение сжатия в углеродосодержащих катодах после их работы в источнике излучения.

Величину напряжений сжатия (растяжения) в разных точках катода можно оценить по сдвигу частоты линии G в спектрах комбинационного рассеяния катода, зарегистрированных в разных точках до и после эксплуатации катода. В точке i величина напряжения сжатия (растяжения) σ_i относительно кристаллического графита определяется следующим выражением [2]:

$$\sigma_i = \frac{\Delta\nu_i}{\alpha},$$

где $\Delta\nu_i = \nu_i - \nu_0$ сдвиг частоты линии G в точке i, ν_i – частота линии G в разных точках исследуемых катодов, $\nu_0 = 1580$ см$^{-1}$ – частота линии G в кристаллическом графите, α – деформационный коэффициент. Поскольку в разных углеродных материалах деформационный коэффициент может отличаться от его значения в кристаллическом графите, то оценивалось относительное изменение напряжения сжатия относительно материала катода до работы в лампе. В этом случае относительное напряжение сжатия $\sigma_i^{отн}$ определялось следующим образом

$$\sigma_i^{\text{отн}} = \frac{\Delta\nu_i}{\Delta\nu_{\text{до}}},$$

где $\Delta\nu_{до} = \nu_{среднее} - \nu_0$, $\nu_{среднее}$ – среднее значение частоты линии G, зарегистрированное в материале катода до эксплуатации.

Спектры комбинационного рассеяния света изучались в катодах, изготовленных из ПАН-волокна, углеродных нанотрубок, мелкозернистого плотного графита и пиролитического графита. Спектры комбинационного рассеяния регистрировались на боковой поверхности в трёх точках катода, работающего в лампе. Первая точка располагалась около металлического держателя, вторая точка – в середине боковой поверхности, и третья точка располагалась около излучающей электроны поверхности. В катодах, которые не эксплуатировались, спектры регистрировались в четырёх точках поверхности, значения частот усреднялись. Как показали оценки, наибольшее изменение напряжения сжатия наблюдается у катода, изготовленного из УНТ, а наименьшее - у катодов, изготовленных из пирографита и ПАН-волокна.

Список литературы

1. Бугаев А.С., Киреев В.Б., Шешин Е.П., Колодяжный А.Ю. Катодолюминесцентные источники света (современное состояние и перспективы) // УФН. 2015. Т. 185. № 8. С. 853-883.

2. Ni Z.H., Chen W., Fan X.F., Kuo J.L., Yu T., Wee A.T.S., Shen Z.X. Raman spectroscopy of epitaxial graphene on a SiC substrate // Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys. 2008. V. 77. P. 1-6.

УДК 535(06)+004(06)

П.В. КАРПАЧ, Г.Т. ВАСИЛЮК, А.А. МАСКЕВИЧ,
Т.С. ГЛЕБОВИЧ, А.О. АЙТ[1], А.М. ГОРЕЛИК[1], С.А. МАСКЕВИЧ[2]
Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Беларусь
[1]Центр фотохимии НИЦ «Курчатовский институт», Москва
[2]Международный государственный экологический институт им. А.Д. Сахарова БГУ, Минск, Беларусь

ГИГАНТСКОЕ КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА В ФОТОХРОМНЫХ НАНОСТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ НАНОЧАСТИЦ Ag И МОЛЕКУЛ ХРОМЕНА

Исследовано усиление комбинационного рассеяния света в гибридных системах, содержащих наночастицы серебра и молекулы хромена.

P.V. KARPACH, G.T. VASILYUK, A.A. MASKEVICH,
T.S. GLEBOVICH, A.O. AYT[1], A.M. GORELIK[1], S.A. MASKEVICH[2]
Y. Kupala Grodno State University, Belarus
[1]Photochemistry Center of NRC Kurchatov Institute, Moscow
[2]International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, Minsk

SURFACE ENHANCED RAMAN SCATTERING IN PHOTOCHROMIC NANOSTRUCTURES BASED ON Ag NANOPARTICLES AND CHROMENE MOLECULES

The enhancement of Raman scattering in hybrid nanostructured systems containing silver nanoparticles and chromene molecules has been studied.

Возможность применения фотохромных би- и мультистабильных соединений в устройствах молекулярной электроники и фотоники (в качестве фотоуправляемых переключателей и сред памяти) вызывает большой интерес исследователей [1]. Использование фотохромов в ансамблях с наночастицами металла позволяет получать фотоуправляемые переключатели электрического сигнала. В то же время, присутствие наноструктурированной металлической поверхности может привести к повышению интенсивности фотохромных превращений за счёт гигантского возрастания электрических полей и их пространственных производных вблизи поверхности металла. При этом возрастают и другие оптические эффекты, например комбинационное рассеяние света.

В настоящей работе методами спектроскопии комбинационного рассеяния (КР), гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) света и квантовой химии исследованы колебательные спектры гибридных фотохромных систем, содержащих металлические наночастицы и молекулы 3,3-дифенил-3Н-бензо[f]хромен-9-ол G618 (пример на рис. 1). Наибольшее усиление (рис. 1) испытывают полосы КР около 490, 549, 582, 811, 962, 1175, 1285, 1317, 1357, 1537 см$^{-1}$, основной вклад в которые вносят плоские колебания циклов. Можно сделать вывод, что в усиление сигнала КР молекул G618, планарно адсорбированных на гладких сфероидальных наночастицах серебра, наибольший вклад вносят плазмонные механизмы (по сравнению с другими электромагнитными механизмами усиления). При этом, наличие полосы около 232 см$^{-1}$, относящейся к колебанию связи «молекула-металл», позволяет говорить о хемосорбции молекул G618 на наночастицах Ag.

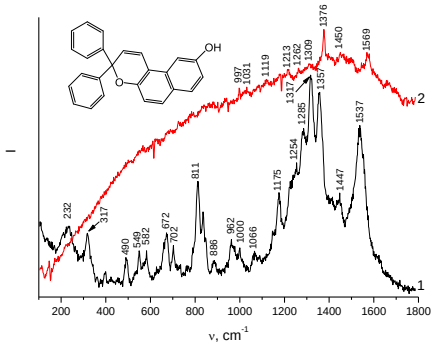


Рис. 1. Спектры гигантского комбинационного рассеяния света твердофазной плёнки (содержащей G618 на золе серебра) на кварце (1) и комбинационного рассеяния света порошка G618 (2) (λ_{ex} = 633 nm)

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь (задание 1.5 ГПНИ “Фотоника и электроника для инноваций”) и бюджетном финансировании РФ работ, проводимых в рамках Государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» в части синтеза и анализа спектральных свойств фотохромных систем.

Список литературы

1. Vasilyuk G.T., et al. // Optics and Spectroscopy. 2022. V. 130. No. 3. P. 361.

УДК 535(06)+004(06)

А.И. ПОНЯЕВ
Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)

ОРГАНИЧЕСКИЕ ФОТОХРОМЫ ДЛЯ ФОТОНИКИ, СИСТЕМ АККУМУЛЯЦИИ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ И МЕДИЦИНЫ

Исследованы новые органические фотохромы, подходящие по совокупности физико-химических и спектрально-кинетических свойств своих основных и возбуждённых состояний, к применению в нанофотонике (восприятие оптической информации, её обработка и хранение), системах аккумулирования солнечной энергии (фотокаталитическое разложение воды до водорода), в фотодинамической терапии онкозаболеваний (фотогенерирование синглетного кислорода).

A.I. PONYAEV
Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University)

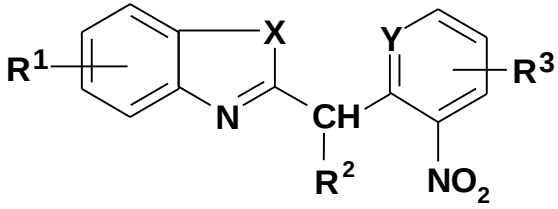
ORGANIC PHOTOCHROMES FOR PHOTONICS, SOLAR ENERGY STORAGE SYSTEMS AND MEDICINE

New organic photochromes were studied that are suitable for use in nanophotonics (perception of optical information, its processing and storage), solar energy storage systems (photocatalytic decomposition of water to hydrogen), and photodynamic therapy of cancer (photogeneration of singlet oxygen) based on the combination of physico-chemical and spectral-kinetic properties of their basic and excited states.

Для фотоники необходимы системы, способные принимать, хранить и обрабатывать оптическую информацию. Для систем преобразования солнечной энергии необходимы вещества – сенсибилизаторы к солнечному свету и фотокатализаторы разложения воды до наиболее эффективного топлива – водорода. Для современной медицины, особенно для лечения онкозаболеваний, используются сенсибилизаторы, способные при облучении превращать молекулярный кислород в больных клетках в синглетный кислород, который уничтожает эти клетки. Фотохромные соединения на молекулярном уровне моделируют электронную логическую ячейку вычислительных машин и могут рассматриваться как основные элементы будущих молекулярных компьютеров:

$\mathbf{А} \underset{h\nu',\triangle}{\overset{h\nu}{\rightleftharpoons}} \mathbf{Б}$	$\mathbf{0} \rightleftharpoons \mathbf{1}$

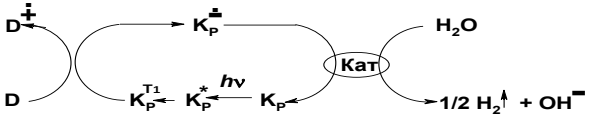
В работе исследованы фотохромные нитропроизводные бензазолов (бензимидазола, бензоксазола, бензтиазола) [1]. Исследуемые соединения представляют собой систему с тремя кислотно-основными центрами: кислой бензильной CH-группой в центре молекулы и основными атомами азота гетероцикла и кислорода орто-нитрогруппы:



X = NH, O, S; Y = CH, N; R^1, R^2, R^3 – разнообразные заместители

В ряду исследованных соединений предложена универсальная схема фото- и темновых процессов в о-нитробензильных азогетероциклах, связывающая исходное соединение (A), его сопряжённую кислоту (AH^+) и фотоиндуцированные азамероцианин ($B^{\pm}$) и анион (B^-).

В системах фотокаталитического разложения воды впервые исследован ряд принципиально важных ксантеновых и тиоксантеновых красителей. За счёт структурных изменений удалось сдвинуть максимум поглощения сенсибилизатора до 650 нм и обеспечить эффективную работу фотокаталитической ячейки разложения воды до водорода видимым светом в двухкомпонентной схеме [2]:



В качестве потенциальных сенсибилизаторов для фотодинамической терапии интересны тиоксантеновые красители. Они обладают достаточно высоким квантовым выходом триплетов (до 0.9), поглощают свет в видимой области спектра, обладают флуоресценцией и фосфоресценцией, которые можно использовать для диагностики распределения сенсибилизатора в тканях организма.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (госзадание FSEN-2023-0002).

Список литературы

1. Ельцов А.В., Поняев А.И., Захс Э.Р., Клемм Д., Клемм Э. Фотохромизм (нитроарил)-(гетарил)алканов // в кн. Органические фотохромы. М.: Химия. 1982. С. 189-224.

2. Ельцов А.В., Поняев А.И., Мартынова В.П. // Журн. общей химии. 1990. Т. 60 (3). С. 708.

УДК 535(06)+004(06)

Н.К. КУЗЬМЕНКО[1], Е.В. КОЛОБКОВА[1,2], М.М. СЕРГЕЕВ[1], Н.В. НИКОНОРОВ[1]
[1]Университет ИТМО, Санкт-Петербург
[2]Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МОДИФИКАЦИИ ФТОРФОСФАТНОЙ СТЕКЛЯННОЙ МАТРИЦЫ С ПРЕКУРСОРАМИ ПЕРОВСКИТА ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАКОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

В работе представлены результаты исследования взаимодействия фемтосекундного лазерного излучения с фторфосфатным стеклом. Была проведена оценка температуры нагрева области облучения с помощью модели теплопроводности. Исследован процесс формирования нагретой области, её размеры и форма в зависимости от параметров излучения.

N.K. KUZMENKO[1], E.V. KOLOBKOVA[1,2], M.M. SERGEEV[1], N.V. NIKONOROV[1]
[1]ITMO University, Saint-Petersburg
[2]Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University)

STUDY OF THE MODIFICATION PROCESS OF A FLUOROPHOSPHATE GLASS MATRIX CONTAINING PEROVSKITE PRECURSORS BY ULTRASHORT LASER PULSES

The work presents the results of a study of the interaction of femtosecond laser radiation with fluorophosphate glass. The heating temperature of the irradiation region was estimated using a thermal conductivity model. The process of formation of the heated region, its size and shape depending on the radiation parameters were studied.

Взаимодействие фемтосекундных лазерных импульсов со стеклом активно изучается в последние годы. Ультракороткие импульсы длительностью менее 10^{-11} с способны модифицировать структуру материала в области расположения перетяжки пучка микронных размеров, где интенсивность излучения максимальна. Локальная модификация стекла без разрушений позволяет использовать его в качестве среды для хранения данных, так как запись информации может осуществляться по трем координатам и с высокой плотностью [1]. Создание ёмкого,

коммерчески доступного устройства хранения данных, устойчивого к электромагнитным помехам и позволяющего осуществлять многократный цикл записи и стирания, является актуальной задачей в современных реалиях, так как высокими темпами развиваются такие технологические области как, например, искусственный интеллект или интернет вещей, которые требуют для себя большие по объёму хранилища информации [2].

Воздействие фемтосекундного излучения на стекло является причиной многофотонного поглощения и последующей ионизации матрицы стекла с образованием плазмы, а также структурной перестройки модификаторов в его составе. Рекомбинация плазмы за счёт теплообмена приводит к нагреву стекла после 5 - 10 пс от начала облучения. Остывание стекла в области взаимодействия занимает несколько сотен наносекунд [3]. Быстрое охлаждение приводит к «заморозке» структурных изменений стекла. К возможным модификациям относятся, например, изменение плотности материала, создание центров окраски или кристаллизация стекла. В работе изучается кристаллизация стекла с прекурсорами перовскитов. Фторфосфатное стекло является прозрачным в видимой области спектра, обладает низкой температурой стеклования ($T_g \approx 400$ °C) и высоким коэффициентом теплового расширения. Такие характеристики позволяют модифицировать стекло при достаточно низких частотах повторения импульсов, что является важной коммерческой составляющей, так как это позволяет осуществить переход от дорогих фемтосекундных лазеров к более доступным системам с частотами до 200 кГц.

В исследовании были получены паттерны, состоящие из кристаллов $CsPbBr_3$, при различных режимах: исследовались скорости (350 - 1400 мкм/с), частоты (10 - 500 кГц) и энергии излучения (до 3 мкДж в импульсе). Для оценки температуры облучённой области была использована модель теплопроводности [4]. Модель учитывает вертикальное и радиальное распределение поглощённой энергии. Для различных параметров излучения температура нагрева составила от нескольких сотен до нескольких тысяч градусов. В процессе исследования наблюдался процесс формирования зоны взаимодействия лазера с веществом, были оценены размеры и форма нагреваемой области, а также скорость и характер её формирования в зависимости от параметров излучения.

Список литературы

1. Sun K., et al. // Adv. Optical Mater. 2021.V. 9. P. 2100094.
2. Jinbo Y., et al. Nanoscale. 2020. V. 12 (46). P. 23391-23423.
3. Royon A., et al. // Optical Materials Express. 2011. V. 1 (5). P. 866-882.
4. Miyamoto I., et al. // Physics Procedia. 2010. V. 5. P. 483-493.

УДК 535(06)+004(06)

Ю.Э. ГЕЙНЦ, Е.К. ПАНИНА
Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА И СОСТАВА ПОРИСТОЙ ОБОЛОЧКИ МИКРОКАПСУЛЫ НА ОСНОВЕ TiO_2 НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОГЛОЩЕНИЯ УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ

Теоретически рассмотрена проблема повышения оптического поглощения сферических микрочастиц типа «ядро-оболочка» (микрокапсул), сформированных при кластеризации наночастиц диоксида титана, для целей усиления их активности в различных процессах фотокатализа растворов. С помощью метода конечных элементов проведено моделирование оптического поля внутри полой микросферы с оболочкой из наночастиц TiO_2, образующих нерегулярную нанопористую структуру. Дано физическое объяснение опубликованным экспериментальным данным по оптической активности титан-диоксидных микрокапсул и показано, что существующие теоретические модели дают не всегда верную интерпретацию наблюдаемых эмпирических закономерностей.

Yu.E. GEINTS, E.K. PANINA
V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siserian Branch of the RAS, Tomsk

EFFECT OF SIZE AND COMPOSITION OF MESOPOROUS SHELL OF TiO_2 BASED MICROCAPSULE ON UV ABSORPTION EFFICIENCY

The problem of increasing the optical absorption of spherical core-shell microparticles (microcapsules) formed by clustering titanium dioxide NPs is considered theoretically for the purpose of enhancing their activity in various photocatalysis processes of solutions. Using the finite element method, the optical field inside a hollow microsphere with a shell of TiO_2 nanoparticles forming an irregular nanoporous structure is simulated. A physical explanation is given for the published experimental data on the optical activity of titanium dioxide microcapsules and it is shown that existing theoretical models do not always provide a correct interpretation of the observed empirical patterns.

Микродисперсные фотокатализаторы на основе диоксида титана (TiO_2) в форме полых микрокапсул с мезопористой структурой оболочки являются широко востребованными в современных критических технологиях, связанных с катализом различных химических веществ, решением экологических проблем, получением дешевого топлива. К настоящему времени известен ряд экспериментальных работ, например,

[1, 2], показывающих, что геометрические параметры микрокапсул (размер, толщина оболочки) заметно влияют на их фотокаталитическую активность. При этом полноценного физического описания оптических свойств пористых микрокапсул в литературе до сих пор не представлено.

На основе численной модели полой микросферы с мезопористой полидисперсной оболочкой были проведены численные расчёты поглощения УФ-излучения (λ = 350 нм) при изменении структурных параметров капсулы. Показана важность пористости оболочки микрокапсулы (рис. 1), то есть наличия промежутков между кластерами наночастиц TiO_2. Оказалось, что нанопоры способствуют реализации аномального подъёма интенсивности оптического поля в этих промежутках и, тем самым, повышают оптическое поглощение всей частицы.

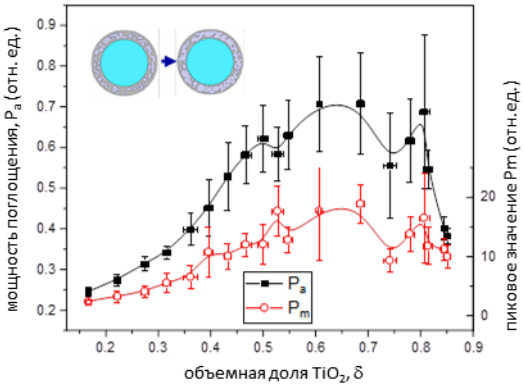


Рис. 1. Влияние пористости оболочки капсул: поглощение капсулой с радиусом ядра R_{core} = 250 нм и радиусом капсулы R_{cap} = 350 нм при изменении доли δ частиц TiO_2, сплошные линии – сплайн-аппроксимация

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ИОА СО РАН.

Список литературы

1. Geints Yu.E., Panina E.K., Zemlyanov A.A. // JOSA B. 2011. V. 28. No. 8. P. 1825-1830.

2. Tsai M.C., Lee J.Y., Chen P.C., Chang Y.W., Chang Y.C., Yang M.H., Chiu H.T., Lin I.N., Lee R.K., Lee C.Y. // Appl. Catal. B: Environmental. 2014. V. 147. P. 499-50.

УДК 535(06)+004(06)

Д.И. КЛИМЕНКО, С.А. ЧЕРЕВКОВ, А.А. БАБАЕВ,
И.Д. СКУРЛОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ КВАНТОВЫЕ ДВУМЕРНЫЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ БЛИЖНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА С ПАССИВИРОВАННОЙ ПЕРОВСКИТОМ ПОВЕРХНОСТЬЮ

В работе рассматривается влияние пассивации свинцово-галогенидным перовскитом $CsPbX_3$ (X = Br, I, Cl) на оптические, люминесцентные, структурные и морфологические свойства полупроводниковых двумерных квантовых гетероструктур PbSe/PbS типа ядро/оболочка и ядро/крылья, излучающих в ближнем инфракрасном диапазоне спектра.

D.I. KLIMENKO, S.A. CHEREVKOV, A.A. BABAEV,
I.D. SKURLOV
ITMO University, Saint-Petersburg

SEMICONDUCTOR QUANTUM TWO-DIMENSIONAL NEAR-INFRARED HETEROSTRUCTURES WITH PEROVSKITE PASSIVATED SURFACE

In this work, the influence of passivation by lead-halide perovskite $CsPbX_3$ (X = Br, I, Cl) on optical, luminescent, structural and morphological properties of semiconductor two-dimensional quantum PbSe/PbS heterostructures of core/shell and core/wings types emitting in the near-infrared region is investigated.

Полупроводниковые квантовые двумерные нанокристаллы и гетероструктуры на их основе с оптическими переходами в ближнем ИК-диапазоне являются перспективным классом наноструктур, применяемых для создания различных оптоэлектронных и фотонных устройств. В данной работе обсуждаются результаты оптимизации структурных и оптических свойств двумерных гетероструктур PbSe/PbS типа ядро/оболочка и ядро/крылья путём пассивации их поверхности неорганическим перовскитом $CsPbX_3$ (X = Br, I, Cl).

Полупроводниковые двумерные квантовые гетероструктуры PbSe/PbS двух типов получены методом катионного обмена из исходных гетероструктур CdSe/CdS [1 - 3]. Пассивация поверхности гетероструктур

PbSe/PbS неорганическим перовскитом $CsPbX_3$ осуществлялась путём замены олеиновой кислоты и последующего фазового перехода, происходившего в процессе смешивания неполярного растворителя, содержавшего нанопластины (НП) PbSe/PbS, с полярным растворителем, содержащим прекурсоры чернил перовскита [4]. Далее была подготовлена серия плёнок, нанесённых на подложки методом spin-coating.

Плёнки НП, пассивированных бромным и хлорным перовскитами, имели наихудшую однородность и большое количество трещин. Исследования распределения сигнала фотолюминесценции (ФЛ) в различных точках йодидной плёнки показали отклонение сигнала ФЛ в пределах 5 %, что говорит о равномерном распределении НП в плёнке, т.о. пассивация йодным перовскитом оказалась наиболее подходящей для формирования тонких плёнок.

Спектры комбинационного рассеяния света свидетельствуют об улучшении кристалличности полученных гетероструктур, поскольку пассивация перовскитом приводит к уменьшению полуширины характерного пика, соответствующего LO-фонону PbSe.

Сравнение спектров фотолюминесценции плёнок НП показало, что при использовании йодных перовскитов сдвиг спектра ФЛ в сравнении с исходными необработанными НП минимален. Отмечается увеличение относительного квантового выхода: для НП типа ядро/оболочка в 2,3 раза, для гетероструктуры типа ядро/крылья в 2,7 раза.

Наличие перовскитной оболочки способствует увеличению среднего времени жизни фотовозбуждённого состояния, что объясняется снижением константы безызлучательной релаксации возбуждённого состояния в результате уменьшения количества ловушечных состояний путем пассивации поверхностных дефектов.

Таким образом, было выявлено, что йодидная пассивация оптимальна для улучшения оптических свойств двумерных гетероструктур.

Список литературы

1. Skurlov I., et al. Temperature-dependent photoluminescent properties of PbSe nanoplatelets // Nanomaterials. 2020. V. 10. No. 12. P. 2570.

2. Kelestemur Y., et al. Platelet-in-box colloidal quantum wells: CdSe/CdS@ CdS Core/Crown@ shell heteronanoplatelets // Advanced Functional Materials. 2016. V. 26. No, 21. P. 3570-3579.

3. Prudnikau A., Chuvilin A., Artemyev M. CdSe–CdS nanoheteroplatelets with efficient photoexcitation of central CdSe region through epitaxially grown CdS wings // Journal of the American Chemical Society. 2013. V. 135. No. 39. P. 14476-14479.

4. Zhang X., et al. Inorganic $CsPbI_3$ perovskite coating on PbS quantum dot for highly efficient and stable infrared light converting solar cells //Advanced Energy Materials. 2018. V. 8. No. 6. P. 1702049.

М.Н. СИДОРОВА[1], Д.И. ЯКУБОВСКИЙ[1], И.А. ЗАВИДОВСКИЙ[1], А.В. АРСЕНИН[1,2]

[1]*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный*

[2]*Исследовательский центр новых технологий, XPANCEO, Дубай, ОАЭ*

СОЗДАНИЕ И ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ УЛЬТРАТОНКИХ ЗОЛОТЫХ КЛАСТЕРОВ, ПОЛУЧЕННЫХ НА КРИСТАЛЛАХ MoS_2

Ультратонкие металлические плёнки толщиной менее 10 нм являются актуальным и перспективным объектом исследований, наряду с ван-дер-ваальсовыми двумерными материалами, поскольку демонстрируют оптические и электрические свойства, значительно отличные от свойств объёмного металла. Помимо своего фундаментального исследовательского интереса, ультратонкие плёнки Au, Ag и Cu являются элементами устройств прозрачной оптоэлектроники и плазмоники. Создание качественных ультратонких плёнок требует использования специальных методик и материалов для роста экстремально тонких (менее 5 нм) сплошных слоёв. В работе представлены результаты получения и характеризации двумерных золотых кластеров на поверхности кристаллов дисульфида молибдена.

M.N. SIDOROVA[1], D.I. YAKUBOVSKY[1], I.A. ZAVIDOVSKIY[1], A.V. ARSENIN[1,2]

[1]*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny*

[2]*Emerging Technologies Research Center XPANCEO, Dubai, United Arab Emirates*

FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF ULTRATHIN GOLD CLUSTERS OBTAINED ON MoS2 CRYSTALS

Ultrathin metal films with a thickness of less than 10 nm are a relevant and promising object of research, along with van der Waals two-dimensional materials, since they demonstrate optical and electrical properties significantly different from the properties of bulk metal. In addition to their fundamental research interest, ultrathin Au, Ag and Cu films are elements of transparent optoelectronics and plasmonics devices. The creation of high-quality ultrathin films requires the use of special methods and materials for the growth of extremely thin (less than 5 nm) continuous layers. The paper presents the results of obtaining and characterizing two-dimensional gold clusters on the surface of molybdenum disulfide crystals.

Ультратонкие плёнки благородных металлов (Au, Ag, Cu) с толщиной менее 10 нм, подобно новым двумерным материалам, являются объектом для исследования уникальных оптических и электрических свойств, а также важным элементом прозрачной электроники и плазмоники, так как характеризуются проводимостью и прозрачностью в видимом и ближнем ИК-диапазоне [1]. Создание высококачественных ультратонких металлических слоёв чаще всего затруднено в силу характерного островкового роста металла на поверхности стандартных подложек (кремний и стекло), который приводит к низким оптоэлектронным характеристикам результирующей плёнки. Применение интерфейсов на основе ван-дер-ваальсовых материалов способно решить задачу получения сплошных ультратонких плёнок. Ранее было продемонстрировано, что использование монослоёв дисульфида молибдена (MoS_2) в качестве подслоя для роста золота позволяет получать ультратонкие и ультрагладкие плёнки, обладающие высокой проводимостью и прозрачностью [2]. Также использование эксфолиированных флейков MoS_2, имеющих атомарно-гладкую поверхность, позволило улучшить свойства полученных на них золотых плёнок [3]. Исследование интерфейса между ультратонким золотом и MoS_2 с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния выявляет существенные изменения в спектре MoS_2, в зависимости от морфологии слоя золота [4, 5].

В работе представлена новая методика создания ультратонких плёнок золота с использованием кристаллических чешуек MoS_2. Результаты сканирующей электронной (СЭМ) и атомно-силовой (АСМ) микроскопии золотых кластеров, выращенных на поверхности MoS_2 выявили сплошную структурную морфологию золота при толщинах в диапазоне от 3 до 4 нм и крупный латеральный размер достигающий 5 мкм. Результаты измерения ультратонких кластеров золота на флейках MoS_2 демонстрируют высокий плазмонный отклик, что является преимуществом для их применения в рамановской микроскопии, плазмонике и оптоэлектронике.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 24-72-10039).

Список литературы

1. Yun J. // Adv. Funct. Mater. 2017. V. 27. P. 1606641.
2. Yakubovsky D.I., Stebunov Yu.V., et. al. // Adv. Mater. Interfaces. 2019. P. 190019.
3. Yakubovsky D.I., Grudinin D.V., et. al. // Nanomaterials. 2023. V. 13(8). P. 1376.
4. Wang S., Li M., Liu Ya., Shi J., et. al. // Materials Today Nano. 2024. P. 100460.
5. Ko T.-S., Chen Y.-L. // Nanomaterials. 2022. V. 12 (5). P. 786.

УДК 535(06)+004(06)

А.И. СИДОРОВ[1,2], К.Г. ЕЛАНСКАЯ[1], А.Н. НАЗАРОВ[1]
[1]Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
[2]Университет ИТМО, Санкт-Петербург

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОДОБРОТНОГО ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ ДВУМЕРНОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА

Приведены результаты моделирования датчика температуры на основе двумерного фотонного кристалла из кремния с отверстиями, заполненными воздухом. Определены температурная чувствительность и добротность датчика.

A.I. SIDOROV[1,2], K.G. ELANSKAIA[1], A.N. NAZAROV[1]
[1] Saint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI»
[2]ITMO University, Saint-Petersburg

SIMULATION OF A HIGH-QUALITY TEMPERATURE SENSOR BASED ON TWO-DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTAL

The results of modeling a temperature sensor based on a two-dimensional photonic crystal made of silicon substrate with holes filled with air are presented. The temperature sensitivity and Q-factor are determined.

Фотонные кристаллы, благодаря своим свойствам, могут применяться в различных сферах, таких как управление распространения света, определение наличия в воздухе определённого газа и его концентрации, измерение давления. Одним их таких примеров использования является измерение температуры. Использование фотонных кристаллов в качестве температурных датчиках основано на различных термооптических эффектах, таких как температурное изменение показателя поглощения или преломления твёрдых тел, жидкостей или газов, или сдвиг полосы люминесценции [1]. В большинстве случаев, основой таких датчиков является одномерный или двумерный фотонный кристалл или фотоннокристаллическое волокно. Датчики на основе двумерных фотонных кристаллов обладают высокой добротностью, но их чувствительность ниже, чем у большинства датчиков на основе одномерных фотонных кристаллов [2 - 5].

Целью работы является моделирование датчика температуры на основе двумерного фотонного кристалла, который обладает высокой

добротностью и температурной чувствительностью. На рис. 1 показана конструкция датчика температуры. В качестве материала структуры был выбран кремний, так как кремниевые технологии в настоящее время очень сильно развиты. Использование кольцевого резонатора позволяет достичь высокой добротности структуры.

У фотонного кристалла с параметрами, указанными на рис. 1, присутствуют фотонные запрещённые зоны в диапазонах 0.80 - 0.83 мкм и 1.512 - 1.597 мкм. В этих диапазонах длин волн свет может распространяться только в пределах волновода и резонатора, обеспечивая работоспособность структуры. В качестве рабочего диапазона длин волн был выбран диапазон 1.512 - 1.597 мкм, так как на таких длинах волн можно вводить излучение с помощью оптоволокна.

На рис. 2 показан сдвиг максимума пропускания при изменении температуры на несколько градусов. Результаты моделирования показали, что данный датчик обладает температурной чувствительностью 0.11 нм/^{o}C, что превосходит чувствительность датчиков, описанных в [2, 3, 5]. Добротность датчика составила 15000, что позволяет точно измерять небольшие температурные изменения.

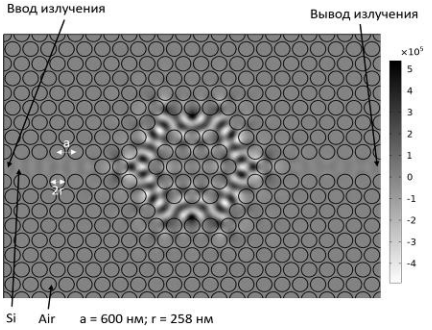


Рис. 1. Вид модели и распределение ТЕ-моды на резонансной длине волны

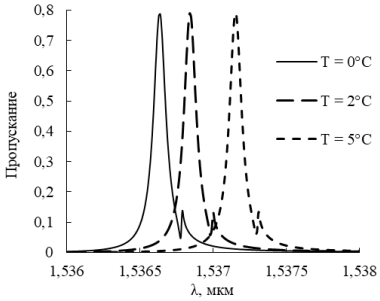


Рис. 2. Смещение максимумов пропускания при изменении температуры

Список литературы

1. Sidorov A.I., Vidimina Yu.O. // Optics and Spectroscopy. 2022. V. 9. P. 1464.
2. Benmerkhi A., Bounouioua A., et al. // Opt Quant Electron. 2021. V. 51 (41).
3. Radhouene M., Chhipa M.K., et al. // Photonic Sens. 2017. V. 7. P. 311.
4. Abadla M.M., Elsayed H.A., et al. // Silicon. 2021. V. 13. P. 4737.
5. Rajasekar R., Robinson S. // Plasmonics 2019. V. 14.

О.В. БУРДУЛЕНКО[1], Д.А. ТАТАРИНОВ[1], Л.Е. ЗЕЛЕНКОВ[1,2]
[1]Университет ИТМО, Санкт-Петербург
[2]Харбинский инженерный университет, Циндао, Китай

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДВОЙНЫХ БЕССВИНЦОВЫХ ПЕРОВСКИТНЫХ МИКРОКРИСТАЛЛОВ Cs_2TeCl_6, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Приведена методика и результат синтеза путём кристаллизации под давлением микрокристаллов двойного перовскита Cs_2TeCl_6, являющихся заменой более токсичным перовскитам на основе галогенида свинца. Обсуждаются возможности применения метода синтеза для других перовскитов со схожей структурой.

O.V. BURDULENKO[1], D.A. TATARINOV[1], L.E. ZELENKOV[1,2]
[1]ITMO University, Saint-Petersburg
[2]Harbin Engineering University, Qingdao, China

RESEARCH OF OPTICAL PROPERTIES OF LEAD-FREE DOUBLE PEROVSKITE MICROCRYSTALS Cs_2TeCl_6 OBTAINED BY PRESSURE-ASSISTED CRYSTALLIZATION

Presents the method and the result of synthesis by pressure-assisted crystallization of microcrystals of double perovskite Cs_2TeCl_6, which are a substitute for more toxic perovskites based on lead halide. Discussion of the possibility of application of the synthesis method for other perovskites with similar structure.

Двойные бессвинцовые перовскиты последние годы привлекают к себе сильное внимание в качестве потенциальной альтернативы перовскитам на основе галогенида свинца в различных областях оптоэлектроники [1, 2]. Такие перовскиты могут быть разделены на две принципиально разные группы, отвечающие формуле $A_2BB`X_6$, где B и B` – ион одновалентного и трёхвалентного металла или ион четырёхвалентного металла и вакансия. Соответственно, последние перовскиты носят название упорядоченных вакансиями двойных перовскитов. Данная работа, в первую очередь, посвящена изучению перовскитов второй группы, в виду наличия у них ряда уникальных свойств: менее токсичны, значительно более высокая стабильность среди всех галогенидных перовскитов, а также наличие существенного стоксова сдвига.

На рис. 1 представлена схема подхода, использованного в работе. Предварительно готовился раствор Cs_2TeCl_6 (0,2 ммоль/мл) в диметилсульфоксиде с использованием $TeCl_4$ и CsCl. Две заранее очищенные стеклянные подложки помещались в П-образный металлический каркас и зажимались с помощью болта, куда затем заливалось 6 мкл раствора Cs_2TeCl_6. После данная конструкция помещалась в высокотемпературную плитку при 100 °C на 16 ч для завершения формирования структур. В ходе эксперимента были получены микрокристаллы Cs_2TeCl_6 с латеральным размером 10 - 20 мкм, имеющие преимущественно форму правильного шестиугольника. Пик спектра фотолюминесценции находится на длине волны 584 нм и имеет значение интенсивности 116 отн. ед. при времени интегрирования 10 с, что показывает невысокие значения интенсивности фотолюминесценции.

Такие оптические свойства характерны теллуровому двойному перовскиту и связаны с искажённой геометрией относительно носителей заряда и сильным рассеянием энергии на октаэдрах $TeCl_6$ [3]. Легирование двойных перовскитов ионами металлов способно привести к улучшению оптических характеристик микрокристаллов состава Cs_2TeCl_6. В дальнейшем возможно применение отработанной методики по синтезу микрокристаллов к легированным двойным перовскитам.

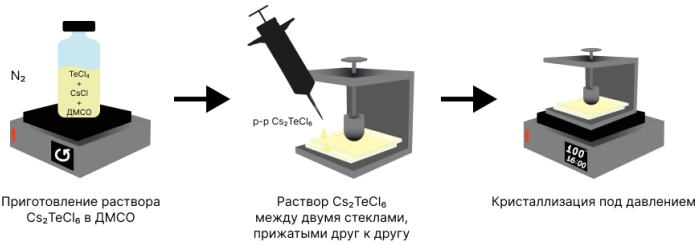


Рис. 1. Схематичная иллюстрация метода получения микрокристаллов перовскита

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 324073.

Список литературы

1. Kung P.K., et al. Lead-free double perovskites for perovskite solar cells // Solar RRL. 2020. V. 4. No. 2. P. 1900306.

2. Wei H., et al. Cs_2SnCl_6: to emit or to catalyze? Te^{4+} ion calls the shots // Advanced Science. 2023. V. 10. No. 29. P. 2302706.

3. Zi L., et al. Highly efficient and stable $Cs_2TeCl_6:Cr^{3+}$ perovskite microcrystals for white light emitting diodes // Journal of Materials Chemistry C. 2023. V. 11. No. 7. P. 2695-2702.

УДК 535(06)+004(06)

Н.И. ВОЛЫНЕЦ[1], Д.С. ДАЙБАГЕ[1,2,4], Д.М. БЕЗВЕРХНЯЯ[3], А.В. ОСАДЧЕНКО[1,2,5], И.А. ЗАХАРЧУК[1,2], С.А. АМБРОЗЕВИЧ[1,2], П.А. САФИУЛЛИНА[1], А.С. СЕЛЮКОВ[1,2,4,5]

[1]*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*
[2]*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*
[3]*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*
[4]*Московский политехнический университет*
[5]*Всероссийский институт научной и технической информации РАН, Москва*

ОПТИКА НАНОКРИСТАЛЛОВ ВО ВНЕШНЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Исследованы оптические свойства коллоидных нанокристаллов $CdTe/SiO_2$ во внешнем электрическом поле. Обнаружено вызванное электрическим полем тушение интенсивности фотолюминесценции нанокристаллов на 23 %, а также небольшое увеличение интенсивности люминесценции при значении напряжённости внешнего электрического поля 60 кВ/см. Наблюдаемое тушение обусловлено уменьшением интеграла перекрытия между волновыми функциями электрона и дырки под действием электрического поля.

N.I. VOLYNETS[1], D.S. DAIBAGYA[1,2,4], D.M. BEZVERKHNYAYA[3], A.V. OSADCHENKO[1,2,5], I.A. ZAKHARCHUK[1,2], S.A. AMBROZEVICH[1,2], P.A. SAFIULLINA[1], A.S. SELYUKOV[1,2,4,5]

[1]*Bauman Moscow State Technical University*
[2]*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*
[3]*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*
[4]*Moscow Polytechnic University*
[5]*Russian Institute for Scientific and Technical Information of the RAS, Moscow*

OPTICS OF NANOCRYSTALS IN AN EXTERNAL ELECTRIC FIELD

Optical properties of colloidal $CdTe/SiO_2$ nanocrystals in an external electric field have been investigated. An electric field-induced quenching of the nanocrystal photoluminescence intensity by 23 %, as well as a slight increase in the luminescence intensity at an external electric field strength of 60 kV/cm were found.

Нанокристаллы (НК) вызывают большой интерес благодаря своим уникальным оптическим свойствам [1, 2]. Возможность управлять их фотолюминесценцией (ФЛ) с помощью внешних факторов, таких как электрическое поле [3], открывает перспективы для применения в

оптоэлектронных устройствах [4, 5]. В работе исследуется влияние внешнего электрического поля на оптические свойства НК $CdTe/SiO_2$.

При увеличении напряжённости внешнего электрического поля интенсивность ФЛ НК снижается: максимум интенсивности уменьшается на 22 %, а интегральная интенсивность (ИИ) — на 23 %. Однако в области 60 кВ/см наблюдается небольшой рост интегральной интенсивности. Внешнее электрическое поле также приводит к тушению как экситонной, так и рекомбинационной ФЛ коллоидных НК $CdTe/SiO_2$. Отметим, что во внешнем электрическом поле спектры ФЛ не смещаются (рис. 1), что свидетельствует о стабильности ширины запрещённой зоны НК.

Тушение интенсивности (и ИИ) ФЛ коллоидных НК обусловлено уменьшением интеграла перекрытия между волновыми функциями электрона и дырки, поскольку во внешнем электрическим поле разноимённые носители заряда локализуются у противоположных стенок сферических НК [6]. Небольшое увеличение ИИ ФЛ (рис. 2) связано с блокировкой процессов захвата носителей заряда поверхностными дефектами.

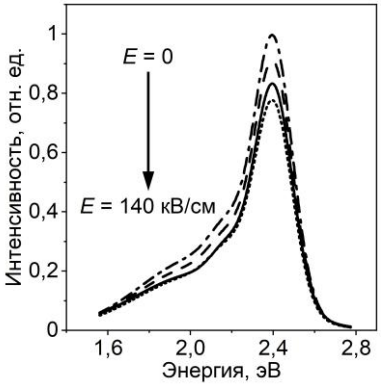


Рис. 1. Спектры ФЛ НК $CdTe/SiO_2$ при различных значениях E

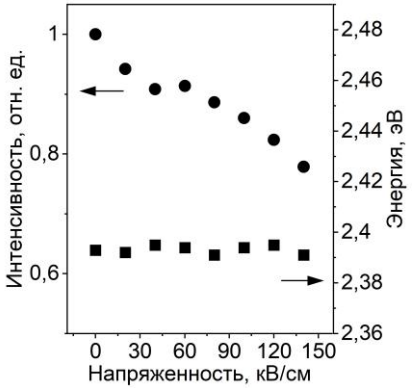


Рис. 2. ИИ ФЛ НК (кружки) и положение максимума интенсивности ФЛ НК $CdTe/SiO_2$ (квадраты) при различных значениях E

Список литературы

1. Gurchenko V., Mazinov A., et al. // Thin Solid Films. 2024. V. 788. P. 140161.
2. Malashin I., Daibagya D., et al. // Materials. 2024 V. 17. P. 5056.
3. Xie S., Zhu H., et al. // Applied Physics Letters. 2022. V. 120. P. 211104.
4. Vashchenko A.A., Vitukhnovskii A.G., et al. // JETP letters. 2014 V. 100, P. 86-90.
5. Lee Y.Y., Sriram B., et al. // Nanomaterials. 2024. V. 14. P. 153.
6. Daibagya D.S., Ambrozevich S.A., et al. // Int. J. Mod. Phys. B. 2024. P. 2540044.

УДК 535(06)+004(06)

А.Н. ХОПЁРСКИЙ, А.М. НАДОЛИНСКИЙ, Р.В. КОНЕЕВ
Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону

ДВУХФОТОННАЯ ИОНИЗАЦИЯ *K*-ОБОЛОЧКИ АТОМНОГО ИОНА

Теоретически предсказаны аналитическая структура и абсолютные значения обобщённого сечения двухфотонной однократной ионизации *K*–оболочки неоноподобного атомного иона. Установлены эффект деструктивной квантовой интерференции амплитуд вероятности переходов в *np*-виртуальные состояния фотовозбуждения и допороговая структура резонансного $1s - 2p$ перехода в остове остатка атомного иона.

A.N. HOPERSKY, A.M. NADOLINSKY, R.V. KONEEV
Rostov State Transport University, Rostov-on-Don

TWO-PHOTON IONIZATION OF THE *K*-SHELL OF AN ATOMIC ION

The analytical structure and absolute values of the generalized cross section of two-photon single ionization of the *K*-shell of a neon-like atomic ion are theoretically predicted. The effect of destructive quantum interference of the probability amplitudes of transitions to np–virtual photoexcitation states and the subthreshold structure of the resonant $1s - 2p$ transition in the composition of the atomic ion residue have been established.

Создание рентгеновского лазера на свободных электронах (XFEL) открывает возможность экспериментального и теоретического исследования двухфотонной (нелинейной) однократной ионизации свободных атомов (атомных ионов) и молекул [1]. В работах [2 - 4] проведены первые теоретические исследования двухфотонной однократной ионизации глубокой $1s^2$-оболочки атомов (Ne, Ar), бериллиеподобных (Ne^{6+}) и гелиеподобных (Ne^{8+}) атомных ионов. В данном сообщении теория работ [2 - 4] обобщается на неоноподобные атомные ионы (Fe^{16+}) и модифицируется для учёта: 1) деструктивной квантовой интерференции парциальных амплитуд вероятности переходов, 2) нетривиальной угловой структуры амплитуды вероятности перехода в конечные состояния *d*-симметрии и 3) полноты набора виртуальных (промежуточных) состояний фотовозбуждения. Учтённые (во втором порядке нерелятивистской теории возмущений) каналы двухфотонной

однократной ионизации представлены на рис. 1 в формализме диаграмм Фейнмана. Результаты расчёта, представленные на рис. 2, демонстрируют ярко выраженные (гигантские) резонансные структуры спектра фотопоглощения: $1s^2 2p^5 + \hbar\omega \to 1s 2p^6$ (рис. 1a); $1s^2 + \hbar\omega \to 1snp$, $n \geq 3$ (рис. 1b).

Следует ожидать, что значения обобщённого сечения на рис. 2 вполне доступны измерению в современном XFEL-эксперименте.

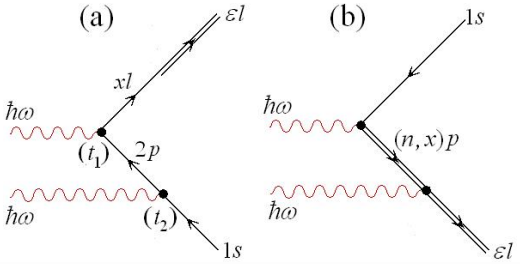


Рис. 1. Амплитуды вероятности двухфотонной ионизации в представлении диаграмм Фейнмана: $\hbar\omega$ – энергия поглощаемого фотона, $l = s, d$, время $t_1 < t_2$, двойная линия – состояние получено в хартри–фоковском поле 1*s*-вакансии

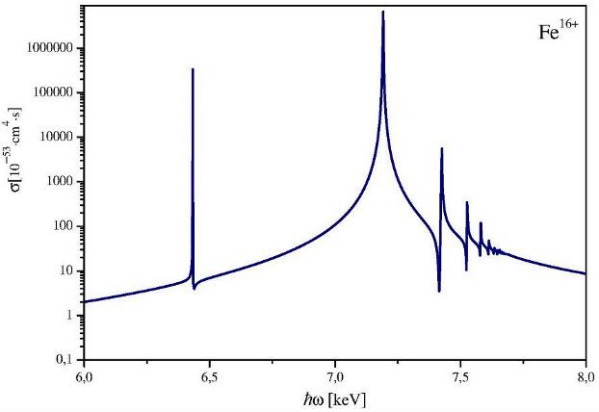


Рис. 2. Обобщённое сечение двухфотонной ионизации *K*-оболочки Fe^{16+}

Список литературы

1. Chergui M., Beye M., Mukamel Sh., Svetina C. Mascioveccio // Nature Rev. Phys. 2023. V. 46. P. 578-596.

2. Novikov S.A., Hopersky A.N. // J. Phys. B. 2000. V. 33. P. 2287-2294.

3. Novikov S.A., Hopersky A.N. // J. Phys. B. 2001. V. 34. P. 4857-4663.

4. Novikov S.A., Hopersky A.N. // Radiat. Phys. Chem. 2002. V. 63. P. 115-120.

УДК 535(06)+004(06)

Ю.А. БЕЗУС, С.А. ФЕДОРОВ, В.В. РУМЯНЦЕВ
Донецкий физико-технический институт им А.А. Галкина

ОСОБЕННОСТИ ЭКСИТОНОПОДОБНЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ В НЕИДЕАЛЬНЫХ ГЕКСАГОНАЛЬНЫХ РЕШЁТКАХ

Исследованы особенности спектра экситоноподобных возбуждений идеальных систем и для систем с дефектами (вакансии в одной из подрешёток). Получены законы дисперсии для исследуемой системы, которая имеет более сложный характер и большее число топологических особенностей.

J.A. BEZUS, S.A. FEDOROV, V.V. RUMYANTSEV
Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering

FEATURES OF EXCITON-LIKE EXCITATIONS IN NON-IDEAL HEXAGONAL LATTICES

The features of the spectrum of exciton-like excitations for ideal systems and for systems with defects (vacancies in one of the sublattices) are investigated. The laws of dispersion are obtained for the system under study, which has a more complex character and a greater number of topological features.

В настоящее время исследованиям оптических свойств систем наномасштаба посвящено достаточно большое количество работ [1 - 3]. Актуальность таких исследований обусловлена современным уровнем развития нанофотоники [1, 2] и необходимостью создания многофункциональных материалов с заданными свойствами [4 - 6].

Целью настоящей работы является исследование сложной системы – нанокристаллической гексагональной двумерной решётки с двумя структурными элементами в элементарной ячейке (рис. 1). Для нахождения спектра искомых электромагнитных возбуждений используется приближение виртуального кристалла, в соответствии с которым матрица $A_{\vec{n}\alpha\vec{m}\beta}$ заменяется на конфигурационно усреднённую, трансляционно инвариантную матрицу $\left\langle A_{\vec{n}\alpha\vec{m}\beta}\right\rangle$ (угловые скобки обозначают процедуру конфигурационного усреднения) и дальнейший расчёт спектра $\omega(\vec{k})$ ($\vec{k}$ – двумерный волновой вектор) проводится стандартным методом [5].

В результате проведённых вычислений, аналитическое выражение для искомой частоты квазичастиц принимает следующий вид:

$$\omega_{1,2}(\vec{k}) = \frac{1}{2\hbar}\left\{ L_{11}(\vec{k}) + L_{22}(\vec{k}) \pm \sqrt{\left[L_{11}(\vec{k}) - L_{22}(\vec{k}) \right]^2 + 4L_{12}(\vec{k})L_{21}(\vec{k})} \right\}, \quad (1)$$

где величины $L_{\alpha\beta}(\vec{k})$, фигурирующие в (1) связаны с $\left\langle A_{\vec{n}\alpha\vec{m}\beta} \right\rangle$ следующим образом: $L_{\alpha\beta}\left(k\right) = \left\langle E_{\vec{n}\alpha} \right\rangle \delta_{\alpha\beta} + \sum_{\vec{m}} \left\langle A_{\vec{n}\alpha\vec{m}\beta} (\delta_{\vec{n}\vec{m}}\delta_{\alpha\beta} - 1) \right\rangle \exp\left[i\vec{k}\left(\vec{r}_{\vec{n}\alpha} - \vec{r}_{\vec{m}\beta} \right) \right]$.

Графическое изображение дисперсионной зависимости экситоноподобных возбуждений, описываемых (1), представлено на рис. 2. Двумерный волновой вектор $\vec{k}$ изменяется в пределах первой зоны Бриллюэна. Расчёт выполнен при значениях концентрации $C_1^V = 0{,}9$.

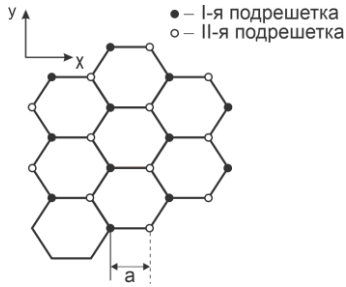


Рис. 1. Гексагональная двухподрешёточная двухмерная решётка

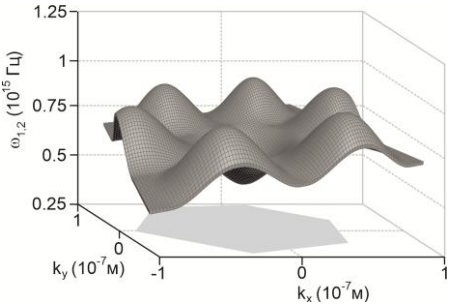


Рис. 2. Дисперсионная зависимость экситоноподобных возбуждений

Сравнивая график функции $\omega_{1,2}(\vec{k}, C^v)$ с графиками в [5] видно, что законы дисперсии экситоноподобных возбуждений имеют более сложный характер, большее число критических точек, большее число топологических особенностей и их типов, чем приведённые в [5].

Список литературы

1. Söllner S., Mahmoodian S., et al. // Nature Nanotechnology. 2015. V. 10. P. 775-778.
2. Lodahl P. // Quantum Science and Technology. 2018. V. 3. P. 013001.
3. Алферов Ж.И., Асеев А.Л. и др. // Микросистемная техника. 2023. № 8. С. 3-13.
4. Rumyantsev V.V., Fedorov S.A., et al. // Phys Sci Biophys J. 2023. V. 7 (1). P. 000242.
5. Rumyantsev V.V., Fedorov S.A., et al. // Scientific Reports. 2014. V. 4. P. 06945.
6. Паладян Ю.А. Эффекты распространения электромагнитных и акустических возбуждений в несовершенных кристаллических средах. Дис. … канд. физ.-мат. наук: 01.04.07. Д.: ДОНФТИ., 2022.

УДК 535(06)+004(06)

М.А. КУЛАГИНА, С.А. ЧЕБАКОВА, Ю.Р. ШУМИЛКИНА, В.В. ФИЛАТОВ
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

ХИРАЛЬНАЯ СИММЕТРИЯ ПОЛЯРИТОНОВ И ЕЁ НАРУШЕНИЕ В КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

Исследована *P*-симметрия поляритонов и её нарушение в кристаллической среде. Установлено, что в критических точках зоны Бриллюэна поляритоны хирально-симметричны, в области нормальной дисперсии присутствуют только «правые» поляритоны (с правой тройкой векторов $\{\boldsymbol{k}, \boldsymbol{E}, \boldsymbol{H}\}$), а в области аномальной дисперсии − только «левые» (с левой тройкой $\{\boldsymbol{k}, \boldsymbol{E}, \boldsymbol{H}\}$). Взаимодействие хирального поляритона с хирально-нейтральным фононом, приводящее к переходу через критическую точку, сопровождается изменением хиральности поляритона на противоположную. Результаты позволяют изучить хиральные эффекты Стандартной модели в условиях оптического эксперимента.

M.A. KULAGINA, S.A. CHEBAKOVA, Yu.R. SHUMILKINA, V.V. FILATOV
Bauman Moscow State Technical University

CHIRAL SYMMETRY OF POLARITONS AND ITS BREAKING IN A CRYSTALLINE MEDIUM

The paper investigates the *P*-symmetry of polaritons and its breaking in a crystalline medium. It is found that in critical points of the Brillouin zone, polaritons are chirally neutral; in the region of the normal dispersion, there are only the “right-hand” (with the right-hand triple $\{\boldsymbol{k}, \boldsymbol{E}, \boldsymbol{H}\}$) polaritons, and in the region of the anomalous dispersion, there are only the “left-hand” (with left-hand triple $\{\boldsymbol{k}, \boldsymbol{E}, \boldsymbol{H}\}$) ones. When chiral polariton absorbs or emits a chirally neutral phonon and then passes through a critical point, its chirality reverses. The results make possible to study chiral effects of the Standard Model in an optical experiment.

На современном этапе развития теоретической физики три фундаментальных взаимодействия (электромагнитное, слабое и сильное ядерное) из четырёх известных (остаётся ещё гравитационное) удается успешно объединить в рамках единой теории − квантовой теории поля с группой симметрии $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$, известной как стандартная модель физики элементарных частиц. Считается, что на горячей стадии большого взрыва квантовые флуктуации привели к спонтанному нарушению некоторых подсимметрий стандартной модели, сделав их

хирально-неоднородными, что повлияло на всю дальнейшую эволюцию вселенной и отчётливо проявляется в настоящую космологическую эпоху. Так, например, во всех нейтринных экспериментах регистрируются только левые (с левой спиральностью) нейтрино всех ароматов и только правые антинейтрино, что является следствием нарушения пространственной чётности (*P*-асимметрии) в подгруппе SU(2) Стандартной модели. В настоящей работе сообщается о новом способе изучения *P*-симметрии и её нарушения на примере поляритонов в кристаллической среде.

Нами были проанализированы свойства решений уравнений Максвелла в диспергирующей кристаллической среде в гармоническом приближении (главный член ряда теории возмущений) и было установлено, что в критических точках зоны Бриллюэна групповая скорость распространения световых волн равна нулю, что означает *T*-симметрию волновой функции, описывающей состояние квантов электромагнитного поля (поляритонов). Заметим, что поляритоны не обладают электрическим зарядом, поэтому они *C*-симметричны, а в силу *CPT*-теоремы должны также быть и *P*-симметричными (хирально-нейтральными), а значит, в указанных областях обратного пространства их волновая функция представляет собой равновероятную суперпозицию волновых функций «правых» (с правой тройкой $\{\boldsymbol{k}, \boldsymbol{E}, \boldsymbol{H}\}$) и «левых» (с левой тройкой $\{\boldsymbol{k}, \boldsymbol{E}, \boldsymbol{H}\}$) электромагнитных квантов.

Взаимодействие *P*-симметричного поляритона с хирально-нейтральным фононом приводит к смещению из критической точки в область нормальной или аномальной дисперсии. Анализ показывает, что в области нормальной дисперсии волновая функция «левых» поляритонов экспоненциально затухает, поэтому остаются только «правые» поляритоны. В области аномальной дисперсии, наоборот, «правые» поляритоны подавляются и остаются только «левые». Это соответствует спонтанному (или вынужденному, если происходит под контролем экспериментатора) нарушению *P*-симметрии поляритона (то есть, U(1)) нейтральной частицей (фононом).

Отметим, что неупругое взаимодействие хирального поляритона с хирально-нейтральным фононом с переходом через критическую точку приводит к изменению хиральности поляритона на противоположную. Последнее представляет чрезвычайный интерес для изучения (и получения в лабораторном эксперименте) хиральных двойников частиц стандартной модели.

УДК 535(06)+004(06)

Т.А. ХУДАЙБЕРГАНОВ
Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых

КВАНТОВЫЙ ПРИНЦИП ПОДЧИНЕНИЯ В ПОЛЯРИТОННОМ ДИМЕРЕ

Предложена модель поляритонного димера с "пустым" микрорезонатором. Предложен "принцип подчинения" для реализации неконвенционального механизма поляритонной блокады. Получен эффект антигруппировки в поляритонном димере.

T.A. KHUDAIBERGANOV
Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs

QUANTUM "SLAVE-PRINCIPLE" IN A POLARITON DIMER

A model of a polariton dimer with an "empty" microresonator is proposed. The "slave-principle" for the implementation of the unconventional mechanism of polariton blockade is introduced. The effect of antibunching in the polariton dimer is observed.

Квантовая модель поляритонного димера [1] – двух полупроводниковых брэгговских микрорезонаторов круглого сечения и более длинной структурой вдоль оси симметрии микрорезонатора, имеющей в центре активную среду (квантовую точку или квантовую яму), с целью создания поляритонов («фотон + экситон»). Согласно стандартному подходу квантовой оптики, такую систему можно описать с помощью линейного дифференциального уравнения на матрицу плотности, известного как уравнение Линдблада [2].

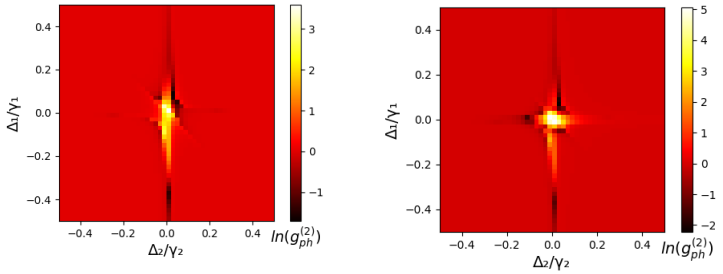
«Быстрая» фотонная мода подчинена «медленной» экситонной моде в терминах Г. Хакена [3]. Условием применимости принципа подчинения служит условие, того, чтобы время релаксации моды первого (a_1) микростолбца была больше времени релаксации моды второго (a_2) микростолбца.

Компоненты поля первого (a_1) микростолбца связаны с компонентами поля во втором (a_2) микростолбце через линейную связь (в стационарном режиме):

$$\widehat{a}_1 = \frac{E_d \widehat{I} + \widehat{F}}{\gamma + i\Delta} - \frac{g}{\Delta - i\gamma}\widehat{a}_2 \,, \qquad (1)$$

где F – сила Ланжевена, для нормально упорядоченных моментов, корреляторы от силы Ланжевена пропорциональны числу тепловых бозонов, если ими пренебречь; γ – параметр диссипации фотонной моды; Δ – полуразность частот двух микропилларов; g – параметр туннельной связи между микропилларами.

На рис. 1 показана квантовая статистика фотонного излучения микростолбца в зависимости от частотных отстроек. Наблюдаются режимы антигруппировки и сверхгруппировки в некоторых областях на многообразии частотных параметров (Δ_1, Δ_2) – разность между частотой соответствующего микропиллара и частотой лазера. Из рис. 1 видно, что антигруппировка поляритонов одиночного микростолбца незначительна, тогда как антигруппировка фотонного излучения заметна в области.



а *б*

Рис. 1 Корреляционная карта второго порядка (по числу частиц) фотонного излучения первого микростолбца (a_1), полученная из численного решения управляющего уравнения с помощью QuTiP версии 4.7.1, Quantum Toolbox на Python (*а*) и на основе принципа подчинения (*б*), параметры: $\gamma_1 = 0.001$ пс$^{-1}$, $\gamma_2 = 0.001$ пс$^{-1}$, $g = 5\gamma_2$, $U/\gamma_2 = 2.2$, $E_d = \gamma_1$

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2024-0018, госзадание ВлГУ). Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2024-0019, госзадание ВлГУ).

Список литературы

1. Andreani L.C., Panzarini G., Gérard J.M. // Theor. Physical Review B. 1999. V. 60 (19). P. 13276.

2. Ohlsson T., Zhou S. // Physical Review A. 2021. V. 103 (2). P. 022218.

3. Хакен Г. Синергетика. Иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. М.: Мир, 1985.

УДК 535(06)+004(06)

В.В. ВОЛКОВА, В.В. ФИЛАТОВ
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

ОПТИЧЕСКАЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ ПРИ КОМНАТНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ, ВЫЗВАННАЯ ДВУХПОЛЯРИТОННЫМИ СОСТОЯНИЯМИ В ФОТОННОМ КРИСТАЛЛЕ

Изучена оптическая сверхпроводимость при комнатных температурах в фотонном кристалле. С помощью численного моделирования показано, что конденсат Бозе–Эйнштейна физически находится в поверхностных микропорах, где автоматически выполняются условия синхронизма. Это позволяет поляритонам беспрепятственно объединяться в аналог куперовских пар, что и представляет собой сверхпроводимость, реализованную в оптической системе.

V.V. VOLKOVA, V.V. FILATOV
Bauman Moscow State Technical University

OPTICAL SUPERCONDUCTIVITY AT ROOM TEMPERATURES CAUSED BY BIPOLARITON STATES IN A PHOTONIC CRYSTAL

Optical superconductivity at room temperatures in a photonic crystal has been studied. Numerical simulation has shown that the Bose–Einstein condensate is physically located in surface micropores, where synchronism conditions are automatically fulfilled. This allows polaritons to seamlessly combine into an analog of Cooper pairs, which is superconductivity implemented in the optical system.

Фотонный кристалл (ФК) – это искусственный метаматериал с периодической оптической сверхструктурой, в котором эффекты интерференции приводят к формированию запрещённых фотонных зон в видимой области электромагнитного спектра [1]. Стоит отметить, что в ФК поляритоны самопроизвольно конденсируются на краях запрещённой фотонной зоны уже при комнатной температуре [2]. Численное моделирование [3] сверхбыстрой динамики электромагнитного поля в ФК демонстрирует Бозе–Эйнштейновскую конденсацию (БЭК) поляритонов на границе фотонной запрещённой зоны в поверхностных микропорах, где автоматически выполнены условия синхронизма, то есть все поляритоны БЭК описываются единой волновой функцией. Поляритоны объединяются в связанные двухполяритонные состояния, которые не чувствительны к

окружению и распространяются в веществе, как если бы это была пустота. Это явление представляет собой сверхпроводимость в оптической системе. Исследование описанного выше процесса составляет интерес настоящей работы.

Ранее нами была установлена возможность бозе-конденсации поляритонов (фотонов) в резонансной оптической микрополости [4] – фотонной ловушке (ФЛ). В настоящей работе в качестве ФЛ предлагается использовать естественные решёточные пустоты (микрополости) фотонного кристалла. В такой микрополости интерференция электромагнитных волн подходящей частоты создает стоячую световую волну, служащую основой поляритонного конденсата Бозе–Эйнштейна [5]. Принципиальная схема ФЛ приведена на рис. 1. Как было обнаружено, резонансное пленение резонансной фотоннокристаллической микрополостью излучения непрерывного лазера позволяет в течение нескольких секунд получить в фокусе ловушки БЭК уже при комнатной температуре.

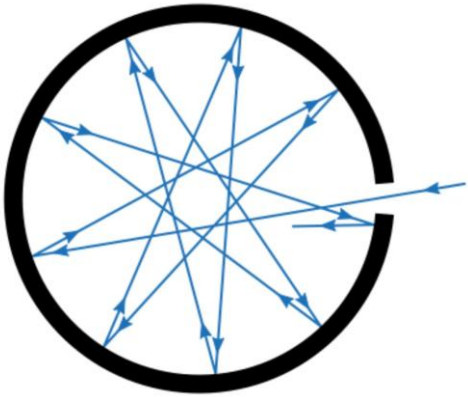


Рис. 1. Принципиальная схема фотонной ловушки

Список литературы

1. Горелик В.С. Квантовая электроника. 2007. Т. 37. № 5. С. 409-432.

2. Волкова В.В., Кулагина М.В., Филатов В.В. // VII Школа-конференция молодых ученых “Прохоровские недели”: сборник тезисов докладов. 2024. № 1. С. 83.

3. Пичкуренко С.В., Филатов В.В. // Ядерная физика и инжиниринг. 2018. Т. 9. № 6. С. 582-584.

4. Klaers J., et al. // Nature. 2010. V. 468. P. 545.

5. Волкова В.В., Филатов В.В. // Труды XII всерос. конф. «Необратимые процессы в природе и технике». 2023. Т. 2. С. 237-239.

УДК 535(06)+004(06)

О.Ф. ВАСИЛЬЕВА
Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко, Тирасполь

САМОЗАХВАТ В СИСТЕМЕ ЭКСИТОН-ПОЛЯРИТОНОВ

Приведены результаты исследования динамики экситон-поляритонов в полупроводниковом микрорезонаторе при накачке нижней ветви закона дисперсии двумя pump-импульсами. Определены условия возникновения явления самозахвата в системе экситон-поляритонов.

O.F. VASILIEVA
Transnistrian State University named after T.G. Shevchenko, Tiraspol

SELF-TRAPPING IN THE EXCITON-POLARITON SYSTEM

The results of a study of the dynamics of exciton-polaritons in a semiconductor microcavity when the lower branch of the dispersion law is pumped by two pump pulses are presented. The conditions for the occurrence of the self-trapping phenomenon in the system of exciton-polaritons are determined.

Экситон-поляритоны – это квазичастицы, образующиеся в результате взаимодействия экситонов и фотонов. Свойства экситон-поляритонов предполагается использовать в ряде оптических и квантовых приборах, таких как оптические вентили [1], интерферометры [2], поляритонные лазеры [3] и другие. Поляритонная генерация – это многообещающее явление, имеющее потенциальное применение в лазерах следующего поколения. При приложении к квантовой яме перпендикулярного магнитного поля, можно существенно изменить свойства конденсата, а соответственно и порог генерации. При низкоэнергетической накачке увеличение магнитного поля задерживает порог генерации, а при высокоэнергетической накачке порог генерации достигается при гораздо меньших интенсивностях накачки [4].

Эксперименты в экситон-поляритонных системах позволили произвести высокоточные измерения констант поляритон-поляритонного взаимодействия, которые являются ключевыми параметрами, определяющими нелинейную динамику конденсированных экситон-поляритонов [5 - 7].

Целью работы является теоретическое исследование динамики экситон-поляритонов в режиме нелинейного параметрического осциллятора при учёте упругих одномодовых и межмодовых поляритон-

поляритонных взаимодействий. Экситон-поляритоны возбуждаются на нижней ветви закона дисперсии, при этом накачка осуществляется двумя pump-импульсами с близкими частотами.

Используя гамильтониан, описывающий динамику системы квазичастиц, аналитически получена система нелинейных дифференциальных уравнений для плотностей экситон-поляритонов и двух компонент поляризации.

Получено, что явление самозахвата в системе экситон-поляритонов возникает, в случае, когда начальная разность фаз равна $\pi/2$. В этом случае уравнение для потенциальной энергии нелинейного параметрического осциллятора имеет либо два, либо четыре действительных корня. При этом при малых значениях нормированной начальной плотности поляритонов холостой моды возникают два действительных и два комплексно-сопряжённых корня. Динамика экситон-поляритонов в этом случае будет периодической: поляритоны накачки обоих импульсов будут конвертироваться в поляритоны сигнальной и холостой моды и обратно. Решение полученных уравнений будет выражаться через эллиптические функции Якоби.

Однако при увеличении нормированной начальной плотности поляритонов холостой моды два средних корня уравнения для потенциальной энергии нелинейного параметрического осциллятора становятся равными друг другу и в системе возникает апериодический режим эволюции.

При увеличении нормированной начальной плотности поляритонов холостой моды возникает область существования четырёх действительных корней уравнения для потенциальной энергии нелинейного параметрического осциллятора. В этом случае динамика системы снова представляет собой периодическую конверсию поляритонов накачки в поляритоны сигнальной и холостой моды. Амплитуды колебаний нормированной плотности накачки резко уменьшается, таким образом в системе квазичастиц наблюдается явление самозахвата.

Список литературы

1. Beierlein J., Rozas E., et al. // Phys. Rev. Lett. 2021. V. 126. P. 075302.
2. Sturm C., Tanese D., et al. // Nature Commun. 2014. V. 5. P. 3278.
3. Azzini S., Gerace D., et al. // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 99. P. 111106.
4. Helluin F., Pinto D., et al. // arXiv. 2024. 2411.04311v1.
5. Estrecho E., Gao T., et al. // Phys. Rev. B. 2019. V. 100. P. 035306.
6. Bleu O., Li G., et al. // Phys. Rev. Res. 2020. V. 2. P. 043185.
7. Li G., Parish M. M., et al. // Phys. Rev. B. 2021. V. 104. P. 245404.

УДК 535(06)+004(06)

П.О. АЛЕКСЕЕНКО, В.В. ВОЛКОВА, Д.А. ГАВРИЛОВЕЦ,
А.Д. КОТОВА, В.В. ФИЛАТОВ
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

ДИСПЕРСИЯ, РЕФРАКЦИЯ И ХИРАЛЬНОСТЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ФОТОННОМ КРИСТАЛЛЕ

Исследована связь дисперсии, рефракции и хиральности электромагнитных волн в фотонном кристалле. Установлено, что в одномерном двухкомпонентном фотонном кристалле в области нормальной дисперсии тройка векторов {$\boldsymbol{k}$, $\boldsymbol{E}$, $\boldsymbol{H}$} правая и рефракция положительная, в области аномальной дисперсии тройка {$\boldsymbol{k}$, $\boldsymbol{E}$, $\boldsymbol{H}$} левая и рефракция отрицательная. Результаты могут использоваться для управления потоками света в примесном сегнетоэлектрическом фотонном кристалле, открывая возможности создания оптического транзистора.

P.O. ALEKSEENKO, V.V. VOLKOVA, D.A. GAVRILOVETS,
A.D. KOTOVA, V.V. FILATOV
Bauman Moscow State Technical University

DISPERSION, REFRACTION AND CHIRALITY OF ELECTROMAGNETIC WAVES IN A PHOTONIC CRYSTAL

The article investigates the relationship between dispersion, refraction and chirality of electromagnetic waves in a photonic crystal. In a one-dimensional two-component photonic crystal, in the region of normal dispersion the triple {$\boldsymbol{k}$, $\boldsymbol{E}$, $\boldsymbol{H}$} is right-handed and the refraction is positive, while in the anomalous region the triple {$\boldsymbol{k}$, $\boldsymbol{E}$, $\boldsymbol{H}$} is left-handed and the refraction is negative. The results allow to control the flow of the light in a doped ferroelectric photonic crystal to use the latter as an optical transistor.

Фотонный кристалл − периодическая оптическая среда с периодом сверхструктуры в диапазоне от 100 до 1000 нм, приводящем к появлению энергетических щелей в оптической области электромагнитного спектра. Присутствие в композите запрещённых фотонных зон открывает возможности воспроизведения микроэлектронных эффектов на новой, фотонной, элементной базе, что представляет исключительный интерес для интегральной фотоники. При этом хиральность оптического поля предоставляет дополнительный канал управления световыми потоками, перспективный для потенциального использования, например, в оптическом аналоге транзистора. В связи с этим целью настоящей работы

является установление связи между дисперсией, рефракцией и хиральностью электромагнитных волн в фотонном кристалле.

Аналогично электронным кристаллам, все важнейшие свойства фотонного кристалла могут быть получены из дисперсионного соотношения $\omega = \omega(\boldsymbol{k})$, связывающего волновой вектор $\boldsymbol{k}$ с частотой ω распространяющегося электромагнитного поля. Так, фазовая скорость u световых волн в композите есть

$$U = c/n = \omega(k)/k = \omega/k(\omega),$$

поэтому спектральное положение областей нормальной ($dn/d\omega > 0$) и аномальной ($dn/d\omega < 0$) дисперсии может быть установлено прямым дифференцированием равенства

$$n = n(\omega) = c \times k(\omega)/\omega,$$

в котором $c = 3\times10^8$ м/с есть скорость света в вакууме, а n представляет собой модуль эффективного показателя преломления. При этом правильный знак рефракции определяется знаком групповой скорости

$$\mathrm{v} = d\omega/dk = [dk(\omega)/d\omega]^{-1},$$

положительное преломление света соответствует $\mathrm{v} > 0$, отрицательная рефракция происходит в области $\mathrm{v} < 0$.

Моделирование свойств стандартного одномерного двухкомпонентного фотонного кристалла показывает, что для такого образца область положительной рефракции совпадает с областью нормальной дисперсии, в то время как в аномальной области преломление света отрицательно. Анализ максвелловских уравнений с учётом материальных соотношений в гармоническом приближении (основной член ряда теории возмущений) выявляет правую (положительную) хиральность тройки векторов $\{\boldsymbol{k}, \boldsymbol{E}, \boldsymbol{H}\}$ в нормальной области и левую (отрицательную) в аномальной (при этом тройка векторов $\{\boldsymbol{k}, \boldsymbol{E}, \boldsymbol{B}\}$ всюду правая).

Таким образом, в фотонном кристалле знаки хиральности, дисперсии и рефракции электромагнитных волн совпадают. Полученный результат может быть использован для управления оптическими потоками посредством «переключения» знака рефракции путём контролируемого инвертирования хиральности оптического поля на сегнетоэлектрическом примесном уровне. Последнее открывает возможности использования примесного сегнетоэлектрического фотонного кристалла в качестве оптического транзистора.

УДК 535(06)+004(06)

С.А. АСТАШКЕВИЧ
Санкт-Петербургский государственный университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЩЁЛОЧНО-СОДЕРЖАЩЕЙ РЕЗОНАНСНОЙ ФОТОПЛАЗМЫ В ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ГАЗОВОЙ ЯЧЕЙКЕ

Предложена процедура определения параметров фотоплазмы в плоскопараллельной газовой ячейке, одна из прозрачных стенок которой освещённая резонансным излучением. Использовано имеющееся в литературе аналитическое выражение для профиля концентрации резонансных уровней. Получены данные о пространственных профилях концентраций заряженных частиц и температуре электронов для смеси паров натрия и аргона в широком диапазоне давлений этих компонент смеси и плотности резонансного излучения.

S.A. ASTASHKEVICH
Saint-Petersburg State University

MODELING OF AN ALKALI-CONTAINING RESONANCE PHOTOPLASMA IN PLANE-PARALLEL GAS CELL

A procedure is proposed for determining the parameters of photoplasma in a plane-parallel gas cell, one of the transparent walls of which is illuminated by resonant radiation. An analytical expression available in the literature is used for the concentration profile of resonant levels. Data on the spatial profiles of charged particle densities and electron temperature for a mixture of sodium vapor and argon in a wide range of their pressures and resonant radiation densities were obtained.

Особенность плоскопараллельной газовой ячейки состоит в том, что при некоторых допущениях в случае, когда толщина ячейки L много меньше размера её боковых стенок, получено аналитическое выражение для пространственного профиля распределения резонансных уровней для пространственно однородного освещения одной из её прозрачных стенок [1]. Эти результаты получены для достаточно широкополосного излучения в области резонансной длины волны, плотность которого не зависит от длины волны. Используя эти данные и модель, учитывающую пеннинговскую и ассоциативную ионизацию, а также другие плазмохимические реакции и амбиполярную диффузию [2], была предложена процедура определения пространственных профилей концентраций заряженных частиц и температуры электронов в

плоскопараллельной ячейке, содержащей смесь паров натрия и аргон. Были получены данные для ячейки шириной $L = 0.01$ м, газовой температуры $T_g = 680$ K, давления паров натрия $P_{Na} = 0.005$ - 0.3 торр, отношения давлений аргона и паров натрия $P_{Ar}/P_{Na} = 10^2$ и плотности резонансного излучения $F = 0.5$ - 5 кВт/(м^2·нм).

На рис. 1 приведены результаты определения пространственных профилей концентрации резонансных уровней Na, ионов Na^+ и Na_2^+ и электронов в рассматриваемой ячейке при давлении паров натрия $P_{Na} = 0.13$ торр, давлении аргона $P_{Ar} = 13$ торр и плотности резонансного излучения $F = 5$ кВт/(м^2·нм). Видно, что наибольшее изменение этих профилей имеет место вблизи освещённой ($x = 0$) и неосвещённой ($x = L$) стенок (ось x – перпендикулярна боковым стенкам ячейки). Следует отметить значительное изменение ионного состава при удалении от освещённой стенки ячейки. Вблизи этой стенки преобладают атомарные ионы натрия, а вблизи тёмной стенки – молекулярные ионы натрия. (рис. 1). На рис. 2 приведён профиль электронной температуры T_e для тех же условий, что и на рис. 1. Видна корреляция профилей концентрации и температуры электронов. Однако относительное изменение температуры электронов существенно меньше изменения их концентрации.

Полученные результаты представляют интерес в исследованиях фотоплазмы в щёлочно-содержащих газовых средах.

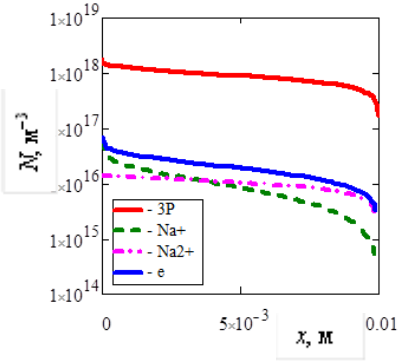


Рис. 1. Пространственные профили концентрации резонансных (3p) уровней натрия, ионов Na^+ и Na_2^+ и электронов

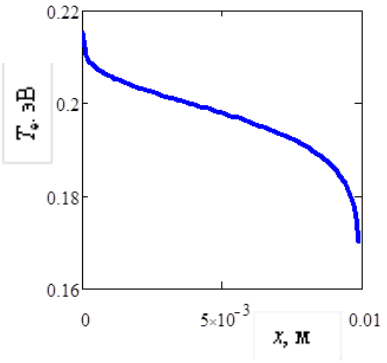


Рис. 2. Пространственный профиль электронной температуры

Список литературы

1. van Tright C. // Phys. Rev. A. 1971 V. 4. No. 3. P. 1303.

2. Astashkevich S.A., Kudryavtsev A.A. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2024. V. 313. P. 108826.

УДК 535(06)+004(06)

С.А. АСТАШКЕВИЧ, А.А. КУДРЯВЦЕВ[1]
Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург
[1]Харбинский технологический институт, Харбин, Китай

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОТО-ЭДС В ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОЙ Na–Ar ГАЗОВОЙ ЯЧЕЙКЕ

Предложена методика определения электродвижущей силы в плоскопараллельной газовой ячейке, одна из прозрачных стенок которой освещена резонансным излучением. Приведены результаты для Na–Ar ячейки для различных давлений компонент газовой смеси и различных плотностях резонансного излучения.

S.A. ASTASHKEVICH, A.A. KUDRYAVTSEV[1]
Saint-Petersburg State University
[1]Harbin Institute of Technology, Harbin, China

DETERMINATION OF PHOTO-EMF IN A PLANE-PARALLEL Na–Ar GAS CELL

A method for determining the electromotive force in a plane-parallel gas cell, one of the transparent walls of which is illuminated by resonant radiation, is proposed. The results for the Na–Ar cell for different pressures of this gas mixture and different resonance radiation densities are presented.

Электродвижущая сила в газовой ячейке может возникать при создании пространственно неоднородной плазмы. Одним из примеров такой неоднородной плазмы является фотоплазма в плоскопараллельной ячейке при освещении только одной из её прозрачных стенок.

Рассмотрим бесконечную плоскопараллельную ячейку шириной $L = 0.01$ м, наполненную смесью паров Na и Ar при температуре $T_g = 680$ К. Будем считать, что левая ($x = 0$) стенка этой ячейки освещена некоторым пространственно однородным световым потоком плотностью F в области резонансных D1 и D2 линий Na, которая является постоянной в некоторой спектральной полосе, ширина которой значительно больше полуширины резонансных линий. В такой ячейке при достаточно больших F создается ионизованная газовая среда, которая состоит из плазмы в центральной области этой ячейки и двух пристеночных слоёв, в которых квазинейтральность не выполняется.

Пространственный профиль электрического потенциала ϕ в плазменной области газовой ячейки зависит от пространственных профилей концентрации N_e и температуры T_e электронов [1]:

$$\phi(x) = -\left(T_e(x) + T_g\right) \ln\left[\left(N_e(x)\left(T_e(x) + T_g\right)\right) \Big/ \left(N_e(x_0)\left(T_e(x_0) + T_g\right)\right)\right], \qquad (1)$$

где x_0 – координата границы пристеночного слоя вблизи освещённой стенки ячейки. Пристеночные падения потенциала могут быть определены по формулам приведённым в [2]. Зная пространственное распределение потенциала во всей ячейке, можно найти фотоЭДС: $U = \phi(L) - \phi(0)$.

Использую модель, развитую в [3], которая учитывала аналитическое выражение для профиля концентрации резонансных уровней в бесконечной плоскопараллельной ячейке [4], плазмохимические реакции и амбиполярную диффузию, были определены профили $N_e(x)$, $T_e(x)$, и также $\phi(x)$ по формуле (1). Результаты для $\phi(x)$ в плазменной области ячейки для давлений P_{Na} = 0.13 торр, P_{Ar} = 13 торр и F = 5 кВт/(м^2·нм) приведены на рис. 1. На рис. 2 приведена зависимость фотоЭДС от P_{Na} при $P_{Ar} = 100 \cdot P_{Na}$ и F =5 кВт/(м^2·нм). Видно, что данные для профиля потенциала и фотоЭДС увеличиваются при увеличении плотности радиации и давления паров натрия.

Полученные результаты представляют интерес в проектировании фотоэлектрических преобразователей на основе газовых ячеек.

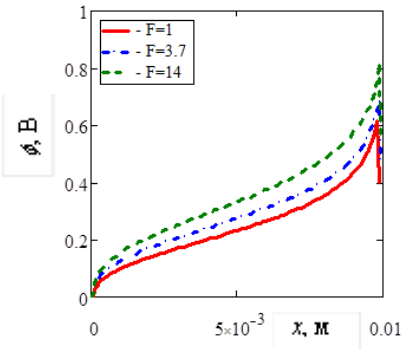


Рис. 1. Профиль потенциала в плазменном объёме ячейке при различных значениях F [кВт/(м^2·нм)]

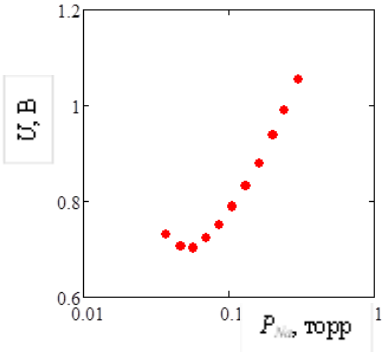


Рис. 2. Зависимость фото-ЭДС в ячейке от давления Na при F = 5 кВт/(м^2·нм)

Список литературы

1. Богданов Е.А., Кудрявцев А.А., Очикова З.Н., Чирцов А.С. // Журн. тех. физ. 2015. Т. 85. № 10. С. 155.

2. Gorin V.V., Kudryavtsev A.A., Yuan C, Zhou Z. // Phys. Plasmas. 2020. V. 27. No. 1. P. 013505.

3. Astashkevich S.A., Kudryavtsev A.A. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2024. V. 313. P. 108826.

4. van Tright C. // Phys. Rev. A. 1971 V. 4. No. 3. P. 1303.

УДК 535(06)+004(06)

Ю.А. ТИМКИНА, И.А. АЛЕЙНИК, М.Д. МИРУЩЕНКО,
Е.В. УШАКОВА
Университет ИТМО, Санки-Петербург

РАЗРАБОТКА ФОТОАКТИВНОГО СЛОЯ НА ОСНОВЕ КВАЗИ-2D ХИРАЛЬНОГО ПЕРОВСКИТА ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ЦИРКУЛЯРНО-ПОЛЯРИЗОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Приведены результаты по формированию хирального квази-2D материала с кристаллической структурой типа перовскит, сформированные методом центрифугирования. Подобраны условия формирования структуры с максимальными значениями коэффициента диссимметрии. Определены длины волн, на которых присутствует сигнал кругового дихроизма, а также рассчитаны коэффициенты диссимметрии на разных длинах волн поглощения.

Yu.A. TIMKINA, I.A. ALEINIK, M.D. MIRUSHENKO,
E.V. USHAKOVA
ITMO University, Saint-Petersburg

DEVELOPMENT OF A PHOTOACTIVE LAYER BASED ON QUASI-2D CHIRAL PEROVSKITE FOR DETECTING CIRCULARLY POLARIZED LIGHT

Results were obtained on the formation of a chiral quasi-2D material with a perovskite-type crystal structure formed by centrifugation. Conditions for the formation of the structure with maximum values of the dissymmetry coefficient were selected. The wavelengths at which the circular dichroism signal is present were determined, and the dissymmetry coefficients at different wavelengths were calculated.

Детектирование циркулярно-поляризованного излучения (ЦПИ) является ключевой технологией для применения в большом количестве приложений, таких как спинтроника [1], медицинские технологии, передача и декодирование информации, оптические радары [2, 3], квантовая оптика и квантовая связь [4, 5], магнитная запись информации [6]. В связи с этим в последнее время увеличилась потребность в мобильных, миниатюрных, гибких и хорошо масштабируемых детекторах ЦПИ. Так как классический детектор ЦПИ представляет собой достаточно большую систему оптических элементов, следует обратить внимание на разработку устройств для прямого обнаружения ЦПИ в широком

спектральном диапазоне с высокой чувствительностью и эффективным разделением и переносом носителей зарядов [7]. Таким перспективным материалом являются материалы, основанные на перовскитах. Внедрение хиральных молекул в структуру перовскита позволяет получать материал, чувствительный к циркулярно поляризованному излучению.

Целью работы является получение хирального квази-2D материала с кристаллической структурой типа перовскит состава APbX3, A2PbX4 или A3Pb2X7, где A – хиральный катион, X – галоген, чувствительного к свету с левой и правой круговой поляризацией. В качестве катионов A были использованы молекулы S-метилбензиламина (S-MBA) и метиламмония (MA) в молярном соотношении 2 : 1.

Хиральный квази-2D перовскит формировался на подложке с помощью метода центрифугирования раствора прекурсоров в присутствии антирастворителя в инертной атмосфере перчаточного бокса. Кристаллическая структура образцов определялась методом рентгеноструктурного анализа (РСА) и показала структуру $MBA_2MAPb_2I_7$ и $MBA_2MAPb_2(Br.I)_7$.

Также были зарегистрированы спектры кругового дихроизма полученных образцов. На образцах состава $MBA_2MAPb_2I_7$ сигнал кругового дихроизма наблюдается на длине волны 500 нм, что соответствует экситонному переходу. Коэффициент диссимметрии (g_{abs}) в данном переходе составил $1{,}0\cdot10^{-4}$. Также имеются ещё два сигнала на длинах волн 370 и 325 нм. Их g_{abs} составил $8{,}8\cdot10^{-5}$ и $1{,}6\cdot10^{-4}$, соответственно. На образцах состава $MBA_2MAPb_2(Br.I)_7$ также наблюдаются два интенсивных сигнала на длинах волн 370 и 325 нм. Их коэффициент диссимметрии составил $1{,}8\cdot10^{-3}$ и $1{,}0\cdot10^{-3}$, соответственно.

Список литературы

1. Wei Q., et al. // ACS Materials Letters. 2021. V. 3. P. 1266-1275.
2. Yang W. et al. // Advanced Science. 2021. V. 8. P. 2100075.
3. Wang X. et al. // Science China Materials. 2021. P. 1230-1237.
4. Sherson J.F. et al. // Nature. 2006. V. 443. P. 557-560.
5. Gisin N., et al. // Nature photonics. 2007. V. 1. P. 165-171.
6. Imai Y., et al // ChemPhotoChem. 2021. V. 5. P. 969-973.
7. Hou H.Y., et al. // Advanced Functional Materials. 2022. V. 32. P. 2209324.

П.Ю. АВДЕЕВ, Е.Д. ЛЕБЕДЕВА, А.Л. АЛФЕРЬЕВ,
А.А. КЛИМОВ, Е.А. КАРАШТИН[1], Н.С. ГУСЕВ[1],
М.В. САПОЖНИКОВ[1], А.М. БУРЯКОВ
МИРЭА – Российский технологический университет, Москва
[1]Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГЕНЕРАЦИЕЙ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СТРУКТУРЕ W/FeGa/Pt НА ПОДЛОЖКЕ PMN-PT

В работе исследуются возможности управления поляризацией терагерцевого (ТГц) излучения при помощи магнитострикции в спинтронном эмиттере на основе структуры W/FeGa/Pt с сегнетоэлектрической подложкой PMN-PT. Экспериментально продемонстрирована возможность изменения угла поляризации и магнитной анизотропии при подаче электрического напряжения, что открывает новые перспективы для разработки управляемых ТГц-эмиттеров.

P.Yu. AVDEEV, E.D. LEBEDEVA, A.L ALFERYEV,
A.A. KLIMOV, E.A. KARASHTIN[1], N.S. GUSEV[1],
M.V. SAPOZHNIKOV[1], A.M. BURYAKOV
MIREA – Russian Technological University, Moscow
[1]Institute of Microstructure Physics of the RAS, Nizhny Novgorod

MAGNITOELECTRIC CONTROL OF TERAHERTZ EMISSION GENERATION IN W/FeGa/Pt STRUCTURE ON PMN-PT SUBSTRATE

This work investigates the possibilities of controlling the polarization of terahertz (THz) radiation by magnetostriction in spintronic emitters based on the W/FeGa/Pt structure with a PMN-PT segmentoelectric substrate. The possibility of changing the polarization angle and magnetic anisotropy when an electric voltage is applied is experimentally demonstrated, which opens new perspectives for the development of controllable THz emitters.

Спинтронные эмиттеры терагерцевого (ТГц) излучения являются одними из наиболее перспективных структур стремительно развивающейся спинтроники [1]. Благодаря высокой напряжённости и большой ширине генерируемого ТГц-излучения [2], а также уникальной возможности управления ТГц-поляризацией при помощи магнитного поля [3], эти источники ТГц-излучения значительно опережают нелинейные

оптические кристаллы и фотопроводящие антенны. Огромным шагом к созданию высокоэффективных управляемых ТГц-источников является магнитоэлектрическое управление процессами ТГц-генерации в спинтронных эмиттерах, расположенных на сегнетоэлектрических подложках [4, 5]. Такое управление достигается за счёт магнитострикции, возникающей в магнитном слое структуры в результате обратного пьезоэффекта, при подаче электрического напряжения на сегнетоэлектрическую подложку. По результатам многих исследований в данной области наиболее оптимальным сегнетоэлектриком для данной цели оказался PMN-PT [4, 5]. Однако, материалы, входящие в состав спинтронного эмиттера, являются неоптимизированными. В частности, по нашему мнению, незаслуженно обделён вниманием один из лучших магнитострикционных материалов – FeGa.

В своей работе мы исследуем магнитоэлектрическое управление в структуре W/FeGa/Pt с толщиной каждого слоя 3 нм на подложке PMN-PT в ориентации (011). Для обеспечения лучшего электрического контакта с обратной стороны сегнетоэлектрической подложки были нанесены контактные площадки из слоёв Ti и Au толщиной 2 и 10 нм соответственно. Петли сегнетоэлектрического гистерезиса для подложки PMN-PT были получены методом Сойера–Тауэра. Кривая намагниченности исследуемой структуры была получена методом экваториального магнитооптического эффекта Керра. Эксперимент проводился при помощи методики терагерцевой спектроскопии временного разрешения (THz-TDS) в геометрии на отражение. Подробное описание экспериментальной установки приведено в работе [6]. Продемонстрировано управление поляризацией ТГц-излучения путём приложения электрического напряжения к образцу. Зависимости пикового ТГц-сигнала от величины электрического напряжения (электрический ТГц-гистерезис) при различных величинах магнитного поля позволили определить диапазон угла поворота ТГц-поляризации α. Также было продемонстрировано изменение магнитной анизотропии в результате магнитострикции при приложении электрического поля к PMN-PT.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-19-00849).

Список литературы

1. Wu W., Yaw Ameyaw C., Doty M.F., Jungfleisch M.B. // J. Appl. Phys. 2021. V. 130.
2. Seifert T., et al. // Nat. Photonics. 2016. V. 10. P. 483-488.
3. Khusyainov D., et al. // Sci. Rep. 2021. V. 11. P. 697.
4. Agarwal P., Huang L., Ter Lim S., Singh R. // Nat. Commun. 2022. V. 13. P. 4072.
5. Lezier G., et al. // Appl. Phys. Lett. 2022. V. 120.
6. Buryakov A.M., et al. // Appl. Phys. Lett. 2023. V. 123. P. 082404.

УДК 535(06)+004(06)

Н.Х. ЧИНЬ[1], А.В. ЩУКО, М.П. ПАТАПОВИЧ
Белорусская государственная академия связи, Минск
[1]Университет Винь, Ханой, Вьетнам

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СДВОЕННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ МАКРО- И МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В СОСТАВЕ РАЗЛИЧНЫХ ИССЛЕДУЕМЫХ ОБРАЗЦОВ

Изучены свойства различных веществ (сплавов, биообъектов), содержащих в своем составе магний. Эксперименты были проведены с помощью лазерного двухимпульсного атомно-эмиссионного многоканального спектрометра LSS-1. Представлено краткое обсуждение результатов.

N.H. TRINH[1], A.V. SHCHUKO, M.P. PATAPOVICH
Belarusian State Academy of Communications, Minsk
[1]Vinh University, Hanoi, Vietnam

APPLICATION OF THE METHOD OF DUAL LASER PULSES TO DETERMINE THE CONTENT OF MACRO- AND MICROELEMENTS IN THE COMPOSITION OF VARIOUS SAMPLES STUDIED

The properties of various substances (alloys, biological objects) containing magnesium in their composition have been studied. The experiments were carried out using a laser double-pulse atomic emission multichannel spectrometer LSS-1. A brief discussion of the results is presented.

В промышленности, благодаря своей лёгкости и прочности, широко применяются сплавы, включающие в свой состав магний. Кроме того, магний является жизненно важным элементом, находящимся во всех тканях организма. Он необходим для нормального функционирования клеток [1].

С целью определения наличия магния в различных образцах был использован лазерный двухимпульсный атомно-эмиссионный многоканальный спектрометр LSS-1, характеризующегося возможностью подбора оптимальных условий работы (энергии импульсов, параметра расфокусировки) для получения качественных результатов. Изменение параметров лазерного излучения осуществляется через программное обеспечение LaesSpectrometer, которое позволяет управлять параметрами

лазера [2]. Имеется возможность регистрировать спектры исследуемых образцов для последующего анализа данных. В качестве примера, на рис. 1 и 2, приведены внешний вид изучаемого сплава, содержащего магний, после серии тридцати воздействующих сдвоенных лазерных импульсов, и фрагмент полученного спектра, иллюстрирующий наличие спектральных линий магния. При этом энергия накачки лазера составляла 20 Дж, межимпульсный интервал – 10 мкм, а параметр расфокусировки равнялся 0,5 мм.



Рис. 1. Фотография исследуемого сплава

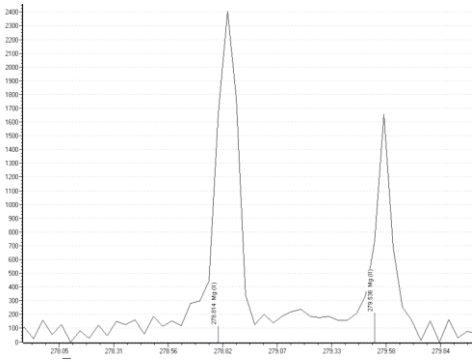


Рис. 2. Фрагмент спектра

Таким образом, полученные результаты отражают возможность исследования различных материалов с целью определения в них различных макро- и микроэлементов.

Список литературы

1. Bogaerts A., et al. // Spectrochimica Acta. Part B: Atomic Spectroscopy. V. 58. No. 11. P. 1867-1893.

2. Баззал Х., Воропай Е.С., Зажогин А.П., Патапович М.П. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2019. Вып. 11. С. 57-64.

УДК 535(06)+004(06)

Л.Н. БОРОДИНА, Д.В. КОНОНОВ, А.В. ПАЛЕХОВА,
Д.Р. ДАДАДЖАНОВ, А.В. ВЕНИАМИНОВ, Т.А. ВАРТАНЯН
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

КОНФОКАЛЬНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ УСИЛЕНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ЛЮМИНОЛА ВБЛИЗИ ПЛАЗМОННОЙ МЕТАПОВЕРХНОСТИ В МИКРОФЛЮИДНОМ ЧИПЕ

Усиление фотолюминесценции люминола на порядок вблизи метаповерхности из плазмонных серебряных наночастиц показано путём трёхмерной визуализации объёма микрофлюидного чипа с помощью конфокальной лазерной сканирующей микроскопии. Ожидается аналогичное усиление хемилюминесценции, возникающей при окислении люминола, и повышение чувствительности хемилюминесцентного сенсора на основе микрочипа.

L.N. BORODINA, D.V. KONONOV, A.V. PALEKHOVA,
D.R. DADADZHANOV, A.V. VENIAMINOV, T.A. VARTANYAN
ITMO University, Saint-Petersburg

CONFOCAL VISUALIZATION OF LUMINOL LUMINESCENCE ENHANCEMENT IN THE VICINITY OF PLASMONIC METASURFACE IN A MICROFLUIDIC CHIP

An order-of-magnitude-enhancement of luminol photoluminescence adjacent to a plasmonic silver nanoparticle metasurface is demonstrated by 3D imaging of the microfluidic chip volume using confocal laser scanning microscopy. Similar enhancement of chemiluminescence arising from luminol oxidation is expected, hence the increase in the sensitivity of chemiluminescence sensor based on the microchip.

Конфокальная микроскопия позволила получить наглядное и количественное подтверждение усиления в несколько раз фотолюминесценции люминола вблизи метаповерхности из серебряных наночастиц, нанесённой на поверхность микрофлюидного чипа сенсорного назначения. В канале микрочипа, не соприкасающемся с метаповерхностью, интенсивность люминесценции почти одинакова по всей толщине раствора, в то время как вблизи метаповерхности она значительно выше (рис. 1) благодаря эффекту Парселла, даже при том, что как возбуждающее излучение, так и люминесценция частично поглощаются метаповерхностью. Для построения объёмного

люминесцентного изображения использован конфокальный лазерный сканирующий микроскоп Zeiss LSM710. Наблюдаемая толщина слоя с повышенной интенсивностью люминесценции значительно превосходит реальную толщину слоя, в котором действует эффект Парселла, и определяется аксиальным разрешением оптической системы микроскопа, которая в свою очередь зависит от диаметра конфокальной диафрагмы и числовой апертуры объектива.

Ожидается, что хемилюминесценция также будет усилена благодаря взаимодействию с плазмонной метаповерхностью, обеспечивая повышение чувствительности хемилюминесцентного сенсора, разрабатываемого для решения биохимических задач [1]. Дополнительному повышению чувствительности сенсора способствуют химические катализаторы хемилюминесцентной реакции [2] благодаря ускорению излучательной дезактивации энергии электронного возбуждения.

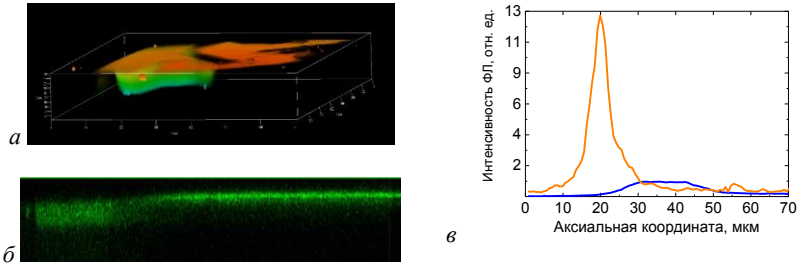


Рис. 1. Картина распределения фотолюминесценции в объёме микрофлюидного чипа (раскраска по глубине) (*а*); её сечение вертикальной плоскостью: слева - контрольная область без метаповерхности, справа – ярко люминесцирующий тонкий слой раствора, прилегающий к плазмонной метаповерхности (*б*); профили интенсивности люминесценции по глубине – под метаповерхностью, с исправлением на её пропускание (оранжевая линия), и в контрольной области (синяя линия) (*в*), длина волны возбуждающего излучения 405 нм, числовая апертура объектива 0.75, шаг сканирования по фокусу 0.7 мкм

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 23-72-00045.

Список литературы

1. Zhu H., et al. // TrAC Trends in Analytical Chemistry. 2023. V. 158. P. 116879.
2. Deepa S., et al. // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2023. V. 1 (3) P. 109853.

УДК 535(06)+004(06)

Н.Х. ЧИНЬ[1], А.В. ЩУКО, В.К. ЛУКЬЯНОВ, М.П. ПАТАПОВИЧ
Белорусская государственная академия связи, Минск
[1]Университет Винь, Ханой, Вьетнам

СОЗДАНИЕ ОЛОВОСОДЕРЖАЩИХ НАНОСТРУКТУР НА РАЗЛИЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ

Изучена возможность получения наноплёнок, содержащих олово, на различных поверхностях. Все эксперименты проводились с помощью лазерного двухимпульсного атомно-эмиссионного спектрометра LSS-1, причём получать можно наноплёнки не только чистых металлов, но и композиционных сплавов.

N.H. TRINH[1], A.V. SHCHUKO, V.K. LUKYANAU, M.P. PATAPOVICH
Belarusian State Academy of Communications, Minsk
[1]Vinh University, Hanoi, Vietnam

CREATION OF TIN-CONTAINING NANOSTRUCTURES ON DIFFERENT SURFACES BY LASER ATOMIC EMISSION SPECTROMETRY METHOD

The possibility of obtaining nanofilms containing tin on various surfaces has been studied. All experiments were carried out using a laser double-pulse atomic emission spectrometer LSS-1, and nanofilms of not only pure metals, but also composite alloys can be obtained.

Развитие микроэлектроники требуется создание качественных наноплёнок, содержащих олово. В частности, плёнки диоксида олова (IV), нанесённые на различные виды поверхности, могут служить датчиками горючих газов в воздухе [1].

Все эксперименты были проведены с помощью лазерного двухимпульсного атомно-эмиссионного многоканального спектрометра LSS-1 [2]. Имеется возможность проводить количественный анализ различных веществ как в твёрдой, так и в жидкой фазе. Изменить параметры лазерного излучения можно через программное обеспечение Laesspectrometer, которое позволяет управлять параметрами лазера. Кроме того, для последующей обработки результатов, сохраняются зарегистрированные спектры в формате MS Office Excel. В случае необходимости представить полученные результаты после

соответствующей обработки можно также с помощью других программ. В качестве примера, на рис. 1 и 2, приведён внешний вид поверхности исследуемого объекта после серии воздействующих сдвоенных лазерных импульсов и фрагмент зарегистрированного спектра сплава, содержащего олово, после обработки в программе Origin. Энергия импульсов составляла 53 мДж, а межимпульсный интервал – 10 мкс.



Рис. 1. Фотография поверхности исследуемого материала

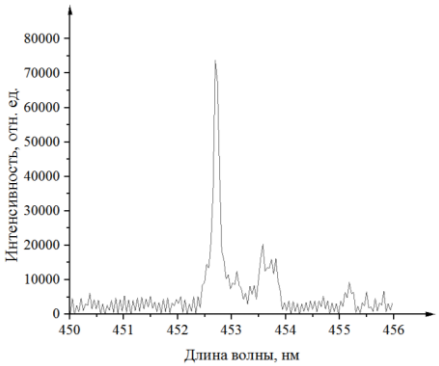


Рис. 2. Фрагмент спектра исследуемого объекта

Таким образом, спектроскопические исследования лазерной плазмы вблизи мишени, содержащей частицы олова, при воздействии серии сдвоенных лазерных импульсов, отражают возможность не только контролировать и управлять компонентным составом плазмы, но и менять состав и свойства полученных наноструктур.

Список литературы

1. Григорьянц, А.Г. Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение, 1989.

2. Зажогин А.П., Чинь Н.Х., Малец М.А., Патапович М.П. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2022. Вып. 14. С. 602-608.

УДК 535(06)+004(06)

А.А. МАКОВЕЦКИЙ, С.М. ПОПОВ, Д.В. РЯХОВСКИЙ,
А.А. ЗАМЯТИН
Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

ВОЗБУЖДЕНИЕ ГИБРИДНОЙ МОДЫ МНОГОМОДОВОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА С НАИБОЛЬШИМ АЗИМУТАЛЬНЫМ ЧИСЛОМ (С НАИБОЛЬШЕЙ КАУСТИКОЙ)

Разработан численный алгоритм, позволяющий определить гибридную моду с наибольшим для данного оптического волокна азимутальным числом m_m и рассчитать её радиальный профиль и каустику. Проведена экспериментальная проверка алгоритма по измерениям каустик групп гибридных мод, возбуждённых в кварц-полимерном оптическом волокне с диаметром сердцевины 600 и 200 мкм.

A.A. MAKOVETSKII, S.M. POPOV, D.V. RYAKHOVSKII,
A.A. ZAMYATIN
Fryazino branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS

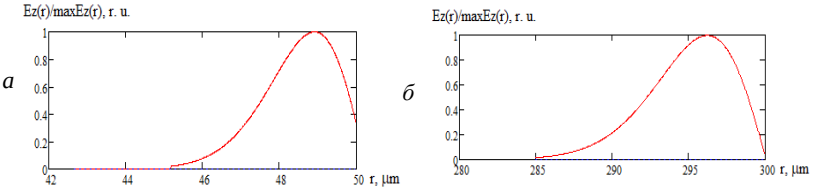
EXCITATION OF A HYBRID MODE OF A MULTIMODE OPTICAL FIBER WITH THE HIGHEST AZIMUTH NUMBER (WITH THE HIGHEST CAUSTIC)

An algorithm for numerical solution of the characteristic equation of a multimode optical fiber has been developed, which allows determining the hybrid mode with the largest azimuthal number mm for a given optical fiber and calculating its radial profile and caustic. An experimental verification of the algorithm for measuring the caustics of groups of hybrid modes excited in a silica-polymer optical fiber with a core diameter of 600 and 200 μm was carried out.

Многомодовые кварцевые оптические волокна (ОВ) с диаметром световедущей сердцевины 200 - 600 мкм широко используются в технологии и лазерной медицине [1]. Одна из практических задач при работе с многомодовыми ОВ – селективное возбуждение гибридных мод.

Алгоритм численного решения характеристического уравнения многомодового ОВ разработан в [2]. На рис. 1 представлены рассчитанные радиальные профили мод с $m = m_m$ в сердцевине ОВ для КП-ОВ/100 μm ($m_m = 233$) и КП-ОВ/600 μm ($m_m = 1445$). Основная доля излучения моды

с $m = m_m$ распространяется в трубке с внешним радиусом a (радиус ОВ), внутренним r_c (расстояние, на котором интенсивность излучения составляет 0,05 от максимального значения). Коэффициент каустики $\chi_m = (a - r_c) / a$.



а *б*

Рис. 1. Нормированные радиальные профили гибридной моды с $m = m_m$ оптических волокон КП-ОВ/100 μm (*а*) и КП-ОВ/600 μm (*б*)

Эксперименты были проведены на кварц-полимерных ОВ с диаметрами сердцевин 200 и 600 мкм. Параллельным сдвигом плоскости падения луча относительно оси ОВ и регулировкой угла падения луча на торец ОВ добивались возбуждение излучения с максимально возможной каустикой (рис. 2).



а *б*

Рис. 2. Распределение интенсивности поля излучения с наибольшей каустикой $\overline{\chi} \approx 0{,}95$ в КП-ОВ/600 μm (*а*) и $\overline{\chi} \approx 0{,}93$ в КП-ОВ/200 μm (*б*), объектив 10 ×, 0.4, λ = 532 nm.

По измеренным значениям величин $\overline{\chi}$ получили оценки: $m_m \approx 465$ (КП-ОВ/200 μm) и $m_m \approx 465$ (КП-ОВ/600 μm). Они отличаются от расчётных значений m_m не более чем на 3.5 %.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Список литературы

1. Тучин В.В. Лазеры и волоконная оптика в биомедицинских исследованиях. М.: Физматлит, 2010.

2. Маковецкий А.А. // Оптика и спектроскопия. 2021. Т. 129 (9). С. 1198.

УДК 535(06)+004(06)

С.А. АСТАШКЕВИЧ, И.А. ВИНОГРАДОВ[1], И.Ч. МАШЕК,
С.Д. РОГАЛЕВ[1], П.Д. СВАТИКОВА[1]
Санкт-Петербургский государственный университет
[1]Государственный научно-исследовательский институт прикладных проблем, Санкт-Петербург

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКАЯ ПРИВЯЗКА ЛАЗЕРА К РЕЗОНАНСНЫМ ПЕРЕХОДАМ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ

Предложен прототип устройства для привязки зондирующего лазера к D2 линии Na. Использованы результаты компьютерного моделирования сечения поглощения D2 линии Na.

S.A. ASTASHKEVICH, I.A. VINOGRADOV[1], I.C. MASHEK,
S.D. ROGALEV[1], P.D. SVATIKOVA[1]
Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg
[1]GosNIIPP, Saint-Petersburg

INTERFOROMETRIC BINDING OF LASER TO RESONANCE TRANSITIONS OF ALKALI METALS

A prototype of a device for binding a probing laser to the D2 line of the Na is proposed. The results of computer simulation D2 line of the Na absorption cross section have been used.

Полное сечение поглощения D2 линии Na определяется, исходя из анализа его сверхтонкой структуры [1 - 3]. Спектральный профиль сечения поглощения D2 линии Na зависит от условий среды: давления, температуры, влажности [3, 4]. При исследовании процессов лазерно-индуцированной флуоресценции всё это обусловливает необходимость контроля совпадения полосы излучения зондирующего лазера со спектральным профилем сечения поглощения D2 линии Na, содержащегося в исследуемой ячейке, а при наличии возможности регулировки длины волны лазера – обеспечить её подстройку.

Устройство для привязки зондирующего лазера к D2 линии Na представляет собой оптическую скамью, на которой установлены исследуемая ячейка с Na и зондирующий лазер. Совмещение излучения зондирующего лазера и D2 линии Na контролируется с использованием интерферометра Фабри–Перо. Примеры полученных интерферограмм приведены на рис. 1 и 2.

Полученные результаты могут представлять интерес для исследования процессов лазерно-индуцированной флуоресценции, а также для настройки (калибровки) излучателей атмосферных лидаров.

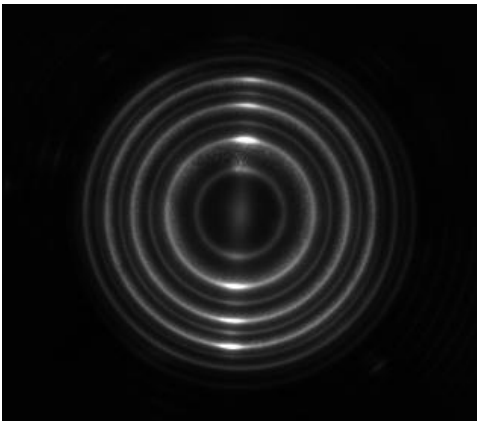


Рис. 1. Интерференционная картина излучения ячейки с Na и зондирующего лазера

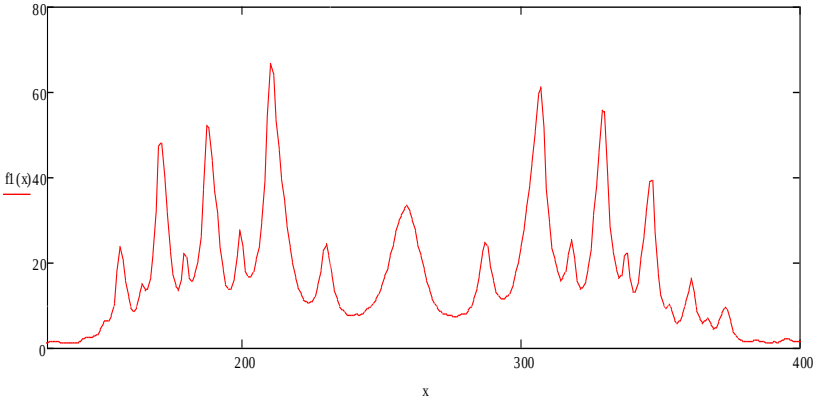


Рис. 2. Распределение интенсивности в сечении интерферограммы

Список литературы

1. Больбасова Л.А., Лукин В.П.. Адаптивная коррекция атмосферных искажений оптических изображений на основе искусственного опорного источника. М.: Физматлит, 2012.

2. Allende Prieto C. Conversion from vacuum to standard air wavelengths. APOGEE. Technical Note. 2011. https://www.as.utexas.edu/~hebe/apogee/docs/air_vacuum.pdf.

3. Ciddor P.E. // Appl. Opt. 1996. V. 35. No. 9. P. 1566.

4. Shi F. // Optics. Publ. Astron. Soc. Pacific (PASP). 2001. V. 113.No. 781. P. 366.

А.В. КОЗЛОВ[1,2], К.А. ЗАГОРУЛЬКО[1], Н.П. ХАТЫРЕВ[1]
[1]Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская обл.
[2]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ЧИСЛЕННОЕ СРАВНЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЯ RIN-ЛАЗЕРОВ ПО СИГНАЛУ БИЕНИЙ ПРИ ОПТИЧЕСКОМ ГЕТЕРОДИНИРОВАНИИ И КЛАССИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Приведены результаты численного сравнения пределов измерения RIN-лазера по сигналу биений при оптическом гетеродинировании и классическим методом. Получено, что предел измерений RIN при малых мощностях исследуемого лазера может быть увеличен более чем на 8 dB.

A.V. KOZLOV[1,2], K.A. ZAGORULKO[1], N.P. KHATYREV[1]
[1]Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radioengineering, Mendeleevo, Moscow region
[2]National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

NUMERICAL COMPARISON OF RIN LASER MEASUREMENT FROM BEATING SIGNAL BY OPTICAL HETERODYNING AND CLASSICAL METHOD

The results of numerical comparison of the limits of laser RIN measurements using the beat signal by optical heterodyning and the classical method are presented. The RIN measurement limit at low powers of laser under test can be increased by more than 8 dB.

Минимально измеримые значения RIN при классических измерениях определяются дробовым шумом [1], который зависит лишь от постоянного тока, который соответственно зависит от оптической мощности сигнала P^0и коэффициента чувствительности α:

$$RIN_{shot} = 10 \cdot \log_{10} \frac{2e}{I_{DC}}, \quad (1)$$

$$I_{DC} = P^o \cdot \alpha \cdot \quad (2)$$

Для того чтобы привести формулы, описывающие ограничение RIN при гетеродинных измерениях следует учесть два фактора:

1) дробовой шум суммарного постоянного сигнала падающего на фотоприёмник;

2) высокочастотную составляющую амплитудного шума сигнала гетеродина, зависящую от RIN (RIN level).

Для первого источника ограничений:

$$RIN_{het\,shot} = 10 \cdot \log_{10} \frac{2e}{\left(P_1^o + P_2^o\right) \cdot \alpha}. \quad (3)$$

Для второго источника ограничение зависит как от уровня постоянного сигнала, так и от уровня сигнала биений:

$$signal\ level = RIN\ level + 10 \cdot \log_{10}\left(\left(\left(P_1^o + P_2^o\right) \cdot \alpha\right)^2 R/1\,mW\right). \quad (4)$$

А для того, чтобы оценить уровень, который добавится к амплитудному шуму необходимо отнять от него мощность сигнала биений:

$$impact = 10^{\left(\frac{signallevel - 10 \cdot \log_{10}\left(2 \cdot \Delta P_1^o \Delta P_2^o\ \alpha^2\ R/1\,mW\right)}{10} - 3\right)}. \quad (5)$$

Тогда общая формула для ограничения измерения RIN при гетеродинировании будет иметь вид:

$$RIN_{het\,\lim} = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{2e}{\left(P_1^o + P_2^o\right) \cdot \alpha} + impact/1\,mW\right). \quad (6)$$

Для того, чтобы провести оценку предела измерений RIN гетеродинированием было проведено моделирование (рис. 1). Сигнал гетеродина и тестируемого лазера изменялся от 1 мкВт до 100 мВт. Коэффициентов чувствительности = 0.5 А/Вт, RIN level = -160 дБн/Гц.

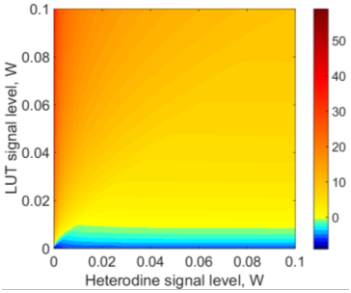


Рис. 1. Разность между пределом измерения RIN-гетеродинированием измеряемыми классическим методом для соответствующих уровней тестируемого сигнала в дБ

В области малых тестируемых сигналов гетеродинные измерения могут увеличить предел измерения RIN на величину превышающую 8 дБ. Ситуация существенно улучшается при замене RIN level на -170, что вполне достижимо, например, DFB полупроводниковыми лазерами.

Список литературы

1. Scott R.P., Langrock C., Kolner B.H. // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2001. V. 7. No. 4. P. 641-655.

УДК 535(06)+004(06)

С.А. АСТАШКЕВИЧ, И.А. ВИНОГРАДОВ[1], И.Ч. МАШЕК,
С.Д. РОГАЛЕВ[1], П.Д. СВАТИКОВА[1]
Санкт-Петербургский государственный университет
[1]Государственный научно-исследовательский институт прикладных проблем, Санкт-Петербург

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАТРИЕВОГО СЛОЯ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ДЛЯ ЛИДАРНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

Проведено моделирование параметров натриевого слоя ионосферы Земли, используя результаты опубликованных экспериментальных и теоретических исследований.

S.A. ASTASHKEVICH, I.A. VINOGRADOV[1], I.C. MASHEK,
S.D. ROGALEV[1], P.D. SVATIKOVA[1]
Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg
[1]GosNIIPP, Saint-Petersburg

MODELLING OF SODIYM LAYER OF THE EARTH IONOSPHERE FOR LIDAR APPLICATIONS

A modelling of the sodium layer of the Earth ionosphere was performed used the published results of experimental and theoretical studies.

Исследования проводились в интересах создания излучателя для лазерной опорной звезды в приложении к астрономическим телескопам с адаптивной оптикой, а также настройки атмосферных лидаров.

Используя опубликованные геофизические [1, 2] и спектроскопические [3] данные проведено моделирование сезонных, суточных и широтных распределений концентрации натрия в ионосфере.

На рис. 1 приведено распределение концентрации натрия по высоте H над уровнем моря для различных широт и сезонов, полученное с помощью данных [2]. Видно, что с увеличение широты возрастает амплитуда изменения концентрации в течение года.

На рис. 2 показано смещение спектрального контура сечения поглощения D2 линии натрия (с учётом её сверхтонкой структуры) на уровне моря в зависимости от погодных условий, используя данные [3]. Видно, что это смещение может в несколько раз превышать полуширину этого контура и поэтому может быть весьма критичным с точки зрения лидарных приложений.

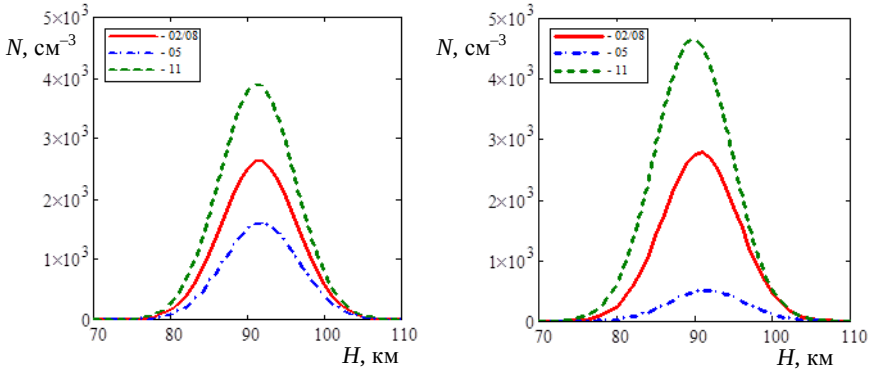


Рис. 1. Распределение концентрации натрия *N* по высоте *H* над уровнем моря при её максимальных (ноябрь), средних (февраль и август) и минимальных (май) значениях в северных широтах 45 ° (слева) и 75 °(справа)

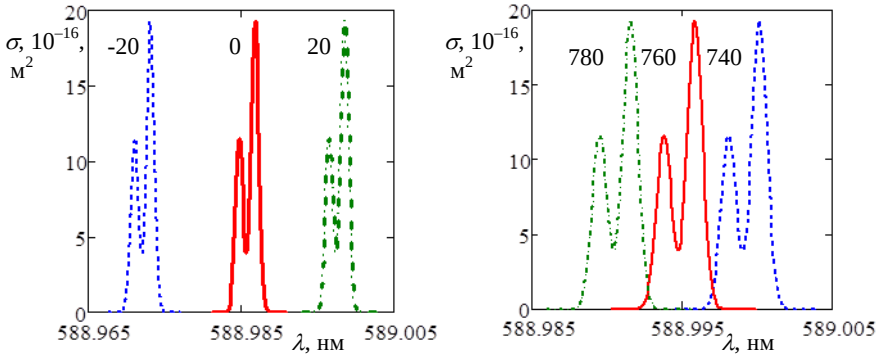


Рис. 2. Смещение спектрального профиля сечения поглощения линии D2 натрия при различных температурах и давлении 760 мм. рт. ст. (слева) и при различных давлениях при температуре 15 °C (справа)

Список литературы

1. Plane J.M.C., Feng W., Dawkins E.C.M. // Chem. Rev. 2015. V. 115. No. 10. P. 4497.

2. Fussen D., Vanhellemont F., Tétard C., et al. // Atmos. Chem. Phys. 2010. V. 10. No. 19. P. 9225.

3. Steck D.A. Sodium D Line Data. 2000. https://steck.us/alkalidata/sodiumnumbers.pdf.

А.В. СЕНЧУРОВА[1,2], А.А. СИРОТКИН[1], Ю.Л. КАЛАЧЁВ[1]
[1]Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва
[2]Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

ВЛИЯНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ И ДЕВОЗБУЖДЕНИЯ ИОНАМИ Nd^{3+} НА ИЗЛУЧЕНИЕ Ho^{3+} С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 3.9 мкм

В настоящей работе представлены результаты исследования спектров поглощения, спектров люминесценции и поуровневой кинетики в кристаллах (CaF_2:Nd^{3+}, CaF_2:Ho^{3+}, CaF_2:Nd^{3+}:Ho^{3+}, YLF:Ho^{3+}:Eu^{3+}), которые могут применяться в качестве активной среды Ho^{3+}-лазера с длиной волны излучения $\lambda \sim 3{,}9$ мкм. Показано, что ионы неодима Nd^{3+} могут быть использованы с одной стороны в качестве сенсибилизатора для накачки уровня $^5I_5$ Ho^{3+}, что позволяет использовать для накачки коммерчески доступные диоды с длиной волны $\lambda \sim 808$ нм, а с другой стороны также решить проблему самоограниченности перехода $^5I_5$ - $^5I_6$.

A.V. SENCHUROVA[1,2], A.A. SIROTKIN[1], Yu.L. KALACHEV[1]
[1]Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow
[2]Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

SENSITIZATION AND DEACTIVATION EFFECT OF Nd^{3+} ON THE Ho^{3+} : 3.9 μm EMISSION

The paper presents results on study of absorption spectra, luminescence spectra and kinetics of different crystals (CaF_2:Nd^{3+}, CaF_2:Ho^{3+}, CaF_2:Nd^{3+}:Ho^{3+}, YLF:Ho^{3+}:Eu^{3+}), which can be used as active element of Ho^{3+}-laser with emission wavelength about 3.9 μm. It is shown that dual effects of Nd^{3+} in Nd^{3+}/Ho^{3+} codoped CaF_2 crystal can act as sensitization and depopulation ions simultaneously, which allows the use of commercial pumping at 808 nm and also solves the problem of self-limitation of the 5I5 - 5I6 transition.

Лазерные источники, излучающие в среднем инфракрасном (MIR) диапазоне длин волн $\lambda \sim 2{,}7$ - 5 мкм, обладают несколькими уникальными характеристиками: находятся в окне прозрачности атмосферы, соответствуют сильным линиям поглощения различных молекул газа, перекрывают сильный пик поглощения воды. Кристаллы, допированные гольмием Ho^{3+}, могут быть использованы в качестве активного элемента твердотельного лазера с излучением длины волны порядка 3.9 мкм (переход Ho^{3+}: $^5I_5$ - $^5I_6$). В работах [1, 2] продемонстрировано получение

генерации с длиной волны 3,9 мкм на кристалле Ho^{3+}:BYF с лазерной и диодной накачкой ($\lambda \sim 889$ нм). Однако отсутствие коммерчески доступной накачки усложняет получение генерации на $\lambda \sim 3{,}9$ мкм. Для решения этой задачи предлагается использовать дополнительное легирование ионами неодима Nd^{3+} в качестве двойного сенсибилизатора:

- для возбуждения верхнего ($^5I_5$) уровня гольмия Ho^{3+};
- для расселения нижнего ($^5I_6$) энергетического уровня гольмия Ho^{3+} , что решает проблему самоограниченности перехода.

В настоящей работе были исследованы кристаллы солегированные ионами Ho^{3+}, Nd^{3+} и Eu^{3+}, CaF_2:Nd(1,5 %):Ho(0,75 %, 1,5 %), CaF_2:Nd(1,5 %), CaF_2:Ho(1,5 %), YLF:Ho(3 %):Eu(1,2 %), в диапазоне длин волн 700 - 5000 нм. Измерения спектров поглощения проводились на спектрофотометре Shimadzu UV-3600 (рис. 1). Спектры люминесценции и кинетика излучения изучались с возбуждением лазерными диодами с волоконным выводом ($\lambda \sim 808$ нм) при помощи монохроматора и приемника VIGO PCI-5.

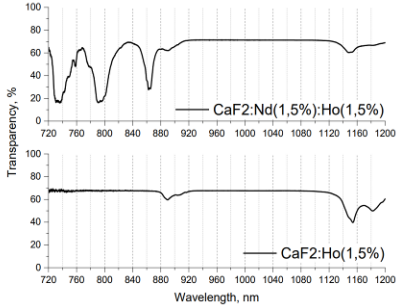


Рис. 1. Спектры поглощения кристаллов CaF_2:Nd^{3+}:Ho^{3+} и CaF_2:Ho^{3+}

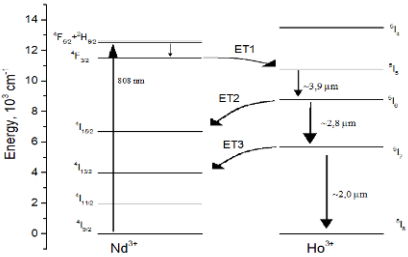


Рис. 2. Энергетические уровни Nd^{3+} и Ho^{3+}

Результаты наших исследований показывают, что ионы Nd^{3+} могут эффективно использоваться в качестве сенсибилизаторов для возбуждения уровня $^5I_5$ иона Ho^{3+}, а также для девозбуждения уровней $^5I_6$ и $^5I_7$ (рис. 2). Таким образом, кристаллы одновременно легированные ионами гольмия и неодима (Ho^{3+}:Nd^{3+}:CaF_2) могут использоваться в качестве перспективных сред для работы лазера с длиной волны ~ 3,9 мкм при возбуждении стандартным лазерным диодом AlGaAs (808 нм).

Список литературы

1. Ma C., et al. // Electronics Letters 2021 V. 57. No. 20. P. 779.
2. Stutz R., Miller H., Dinndorf K. // Proc. of SPIE. V. 5332. P. 111.

УДК 535(06)+004(06)

А.Н. ТЕРПИЦКИЙ, И.В. РЕШЕТОВ, С.А. ЩЕРБАК,
В.П. КААСИК, А.А. ЛИПОВСКИЙ
Академический университет им. Ж.И. Алферова, Санкт-Петербург

ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ГАРМОНИКИ НА ОДНОМЕРНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ В СИЛИКАТНОМ СТЕКЛЕ

Установка электронной литографии использована для записи набора участков с квадратичной оптической нелинейностью в силикатном стекле. Сформированные зарядовые структуры с периодами 4 - 64 мкм продемонстрировали многопорядковую диаграмму направленности излучения второй гармоники при облучении лазером с длиной волны 1.064 мкм. Поляризационные исследования излучения второй гармоники подтвердили применимость соотношений Клейнмана для нелинейного процесса третьего порядка с участием постоянного электрического поля и двух полей оптической частоты в изотропных средах.

A.N. TERPITSKIY, I.V. RESHETOV, S.A. SCHERBAK,
V.P. KAASIK, A.A. LIPOVSKII
Alferov University, Saint-Petersburg

SECOND HARMONIC GENERATION ON ONE-DIMENSIONAL PERIODIC STRUCTURES IN SILICATE GLASS

An electron-beam lithography setup was utilized to inscribe a series of regions with quadratic optical nonlinearity in silicate glass. The resulting charge distribution, with periods ranging from 4 to 64 μm, exhibited a multi-order radiation pattern of second-harmonic generation (SHG) when irradiated by a laser with a wavelength of 1.064 μm. Polarization studies of the SHG emission confirmed the validity of Kleinman symmetry for a third-order nonlinear process involving a static electric field and two optical-frequency fields in isotropic media.

Оптически изотропные стёкла характеризуются наличием центральной симметрии, что исключает возможность генерации второй оптической гармоники (ГВГ) в этих материалах.

В работе для снятия центральной симметрии стекла использовалось постоянное электрическое поле электронов, захваченных стеклом при его облучении электронным пучком [1]. Это электрическое поле в сочетании с присущей изотропным средам нелинейностью третьего порядка приводит к формированию эффективной оптической нелинейности второго порядка

(эффект EFISH [2]). Облучение проводилось на стандартной установке электронной литографии, энергия электронов составляла 100 кэВ, доза облучения 8 мкКл/см^2. Записанная зарядовая структура представляла собой набор полос с ширинами 2, 4, 8, 16 и 32 мкм, ширина промежутков между полосами совпадала с шириной полос для каждого набора. Исследовалась генерация второй гармоники (длина волны 532 нм) излучения пикосекундного лазера (длина волны 1064 нм), нормально падающего на поверхность образца (рис. 1).

Диаграммы направленности излучения второй гармоники продемонстрировали наличие множественных интерференционных пиков, подобных дифракционным максимумам фазовой дифракционной решётки с π-модуляцией фазы (рис. 2).

Поляризационные исследования диаграмм излучения второй гармоники подтвердили применимость соотношений Клейнмана [3] для нелинейного процесса третьего порядка в изотропных средах с участием постоянного электрического поля и двух полей оптической частоты.

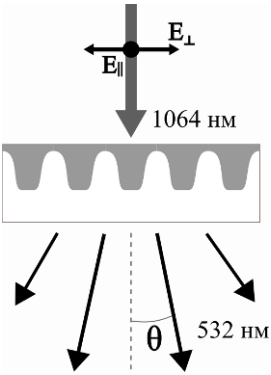


Рис. 1. Схема измерений, серая область в стекле – распределение плотности электронов

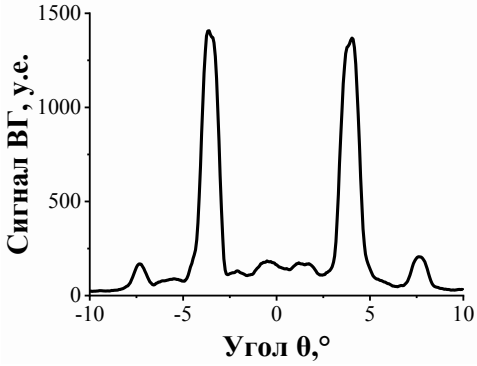


Рис. 2. Диаграмма направленности излучения ВГ для зарядовой структуры с шириной полосы 4 мкм при поляризации фундаментальной волны E□

Работа выполнена при финансовой поддержке министерства науки и образования Российской Федерации, проект FSRM-2023-0009.

Список литературы

1. Kazansky P.G., Kamal A., Russell P.S.J. // Opt. Lett. 1993. V. 18. No. 9. P. 693-695.
2. Statman D., Georges III J.A. // J. Appl. Phys. 1996. V. 80. No. 2. P. 654-661.
3. Kleinman D.A. // Phys. Rev. 1962. V. 128, No. 4. P. 1761-1775.

УДК 535(06)+004(06)

Е.С. ВОРОПАЙ, М.Н. КОВАЛЕНКО, Н.А. АЛЕКСЕЕНКО[1], А.П. ЗАЖОГИН
Белорусский государственный университет, Минск
[1]Институт порошковой металлургии, Минск, Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРИ НАПЫЛЕНИИ НАНОПЛЁНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ ИЗ ОКСИДОВ МЕДИ, ЛЕГИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗОМ, ПРИ ЛАЗЕРНОМ РАСПЫЛЕНИИ МЕДИ И ЖЕЛЕЗА В АТМОСФЕРЕ ВОЗДУХА

Изучены процессы при напылении газочувствительных наноплёночных резисторов из оксидов меди, легированных оксидами железа, методом абляции сдвоенными лазерными импульсами гибридной мишени состоящей из склеенных между собой пластинок из меди М2 и стали 08кп в атмосфере воздуха. Резистор напылён на дорожку шириной 300 мкм изготовленной в медной фольге на фольгированном стеклотекстолите. Оценены параметры чувствительности сенсора на аммиак, воду, уксусную кислоту.

E.S. VOROPAY, M.N. KOVALENKO, N.A. ALEKSEENKO[1], A.P. ZAJOGIN
Belarusian State University, Minsk
[1]Powder Metallurgy Institute, Minsk, Belarus

STUDY OF PROCESSES IN THE DEPOSITION OF NANOFILM RESISTORS FROM COPPER OXIDES DOPED WITH IRON BY LASER SPUTTERING OF COPPER AND IRON IN AIR ATMOSPHERE

The processes during the deposition of gas-sensitive nanofilm resistors made of copper oxides doped with iron oxides were studied using the method of ablation with double laser pulses of a hybrid target consisting of M2 copper and 08kp steel plates glued together in an air atmosphere. The resistor was deposited on a 300 μm wide track made in copper foil on foil-clad fiberglass. The sensitivity parameters of the sensor to ammonia, water, and acetic acid were estimated.

Плёнки оксидов меди легированных железом, цинком, оловом и другими металлами хорошо зарекомендовали себя в качестве чувствительного слоя газовых сенсоров.

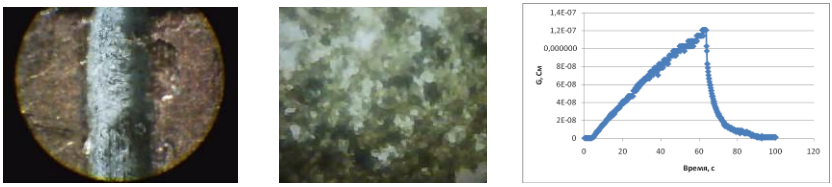
Цель работы состояла в том, чтобы показать возможность и определить условия для получения методом последовательного

воздействия сериями сфокусированных сдвоенных лазерных импульсов на гибридную мишень, состоящую из пластинок меди и железа, в воздушной атмосфере наноплёнок из оксидов меди, легированных оксидами железа, для использования их в качестве газовых сенсоров.

Для проведения исследований использовали лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1.

Напыление на поверхность фольгированного медью стеклотекстолита, с вытравленной полоской, шириной 300 мкм, наночастиц оксидов меди и железа проводилось при воздействии серии из 200 сдвоенных лазерных импульсов на мишень, установленную под углом 50 градусов к падающему излучению и подложке на расстоянии 3 мм. Энергия импульсов излучения 43 мДж, интервал между импульсами 10 мкс. Изменяя количество лазерных импульсов в серии возможно целенаправленно менять состав прекурсоров для изготовления тех или иных наноплёнок.

Изображения поверхности образца с напылённой плёнкой (увеличение 150 раз) и изображения плёнки на поверхности стекла, увеличенные с помощью микроскопа Микмед в 375 раз, приведены на рис. 1*а* и 1*б*. На рис. 1*а* чёрная плёнка – оксид меди CuO. средний размер шариков составляет примерно 1 - 2 мкм, островки CuO и FeO состоят из кристаллитов размеров 20 - 30 нм, светлые участки поверхности можно отнести к различным оксидам железа.



а *б* *в*

Рис. 1. Образец элемента (*а*); напыление на стекле, увеличение в 375 раз (*б*); реакция сенсора на пары аммиака (*в*)

Начальное сопротивление плёнки (рис. 1*а*) более 1 ГОм при комнатной температуре. Исследована чувствительность плёнки к парам воды, аммиака и уксусной кислоты при комнатной температуре. Плёнка хорошо реагирует на пары NH_3, относительно слабо на воду и практически не чувствует пары уксусной кислоты. Реакция сенсора на пары аммиака приведена на рис. 1*в*.

УДК 535(06)+004(06)

К.Ф. ЕРМАЛИЦКАЯ, Е.С. ВОРОПАЙ, Н.Н. КРАСНОПЕРОВ, А.П. ЗАЖОГИН
Белорусский государственный университет, Минск

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАПЫЛЕНИЯ ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ НАНОПЛЁНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ ИЗ ОКСИДОВ ЖЕЛЕЗА ПРИ ЛАЗЕРНОМ РАСПЫЛЕНИИ ЖЕЛЕЗА В АТМОСФЕРЕ ВОЗДУХА

Исследованы возможности напыления газочувствительных наноплёночных резисторов из оксидов железа, с достаточно хорошими механическими и чувствительными характеристиками, методом абляции сдвоенными лазерными импульсами мишени из стали 08кп на вырезанную в фольге фольгированного стеклотекстолита дорожку в атмосфере воздуха. Проведены исследования влияния количества импульсов и угла воздействия излучения на мишень на процессы при целенаправленном формировании компонентного и зарядового состава лазерного факела направляемого на подложку и качество плёнки.

K.F. ERMALITSKAIA, E.S. VOROPAY, N.N. KRASNOPEROV, A.P. ZAJOGIN
Belarusian State University, Minsk

STUDY OF THE PROCESSES OF DEPOSITION OF GAS-SENSITIVE NANOFILM RESISTORS FROM IRON OXIDES BY LASER SPUTTERING OF IRON IN THE AIR ATMOSPHERE

The possibilities of spraying gas-sensitive nanofilm resistors from iron oxides with sufficiently good mechanical and sensitive characteristics by the method of ablation with double laser pulses of a target made of 08kp steel on a track cut in foil of foil-clad fiberglass in the atmosphere of air were studied. The influence of the number of pulses and the angle of radiation impact on the target on the processes during the targeted formation of the component and charge composition of the laser torch directed to the substrate and the quality of the film were studied.

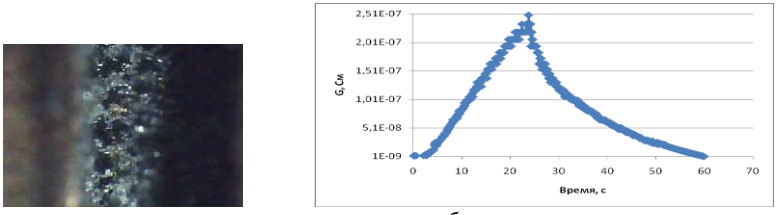
Улучшение функциональных характеристик химических газовых сенсоров может быть достигнуто за счёт использования в качестве газочувствительных материалов оксидов и оксидных композитов, для которых характерно изменение валентного состояния атомов металла при взаимодействии с молекулами детектируемого газа. Одним из важных

материалов для этой области являются оксиды железа. Адсорбционно-каталитические свойства композитов зависят как от размеров частиц, так и от структурных и валентных модификаций Fe-содержащих фаз.

Для проведения исследований использовали лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1. В настоящей работе исследована динамика напыления наноплёнок оксидов железа при воздействии серий последовательных сдвоенных лазерных импульсов на мишень из стали марки 08кп при энергии импульсов 43 мДж, интервале между импульсами 10 мкс от количества импульсов и углов падения лазерного излучения на мишень.

Напыление наночастиц оксидов железа на полоску поверхности стеклотекстолита, шириной 300 мкм, вырезанной в фольгированном медью стеклотекстолите, проводилось при воздействии серии из 200 сдвоенных лазерных импульсов на мишень, установленную под углом 50 градусов к падающему излучению и подложке на расстоянии 3 мм. Энергия импульсов излучения 43 мДж, интервал между импульсами 10 мкс.

Изображение поверхности образца с напылённой плёнкой, увеличенное с помощью микроскопа Микмед в 200 раз, приведено на рис. 1*а*, на рис. 1*б* – отклик элемента на пары аммиака. На рис. 1*а* чёрная дорожка – чёрные оксиды железа ($FeO.Fe_2O_3$), средний размер шариков составляет примерно 1 - 2 мкм. На боковой поверхности медной подложки видны шарообразные кластеры разного цвета.



а *б*

Рис. 1. Изображение поверхности элемента после напыления оксидов железа (*а*); зависимость изменения проводимости элемента от времени воздействия паров аммиака (*б*)

Сенсор работает при комнатной температуре, хорошо чувствует пары аммиака (рис. 1*б*), слабее пары воды. Как видно из графика время отклика примерно равно 20 - 25 с. Время релаксации примерно в два раза больше.

УДК 535(06)+004(06)

А.Ф. КОВАЛЕНКО
Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Москва

ВАРИАНТЫ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ОТЖИГА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛАСТИН С НАНОЧАСТИЦАМИ МЕТАЛЛОВ

В рамках квазистатической и динамической задач термоупругости рассмотрены варианты импульсного лазерного отжига пластин. Проведена экспериментальная проверка адекватности расчётных соотношений.

A.F. KOVALENKO[1]
N.L. Dukhov All-Russian Scientific Research Institute of Automatics, Moscow

VARIANTS OF PULSE LASER ANNEALING OF DIELECTRIC PLATES WITH METAL NANOPARTICLES

Variants of pulsed laser annealing of plates are considered in the framework of quasi-static and dynamic problems of thermo-elasticity. An experimental verification of the adequacy of the calculated ratios was carried out.

В настоящее время для создания новых фотонных сред используют диэлектрические пластины с ионно-синтезированными наночастицами металлов [1]. Для отжига пластин после ионной имплантации используют импульсные лазеры, работающие в режимах свободной генерации или модулированной добротности. Для оценки результата воздействия в режиме свободной генерации можно рассматривать квазистатическую задачу термоупругости [2], а в режиме модулированной добротности – динамическую задачу термоупругости [3]. Будем считать пластину термостойкой, если она не будет разрушена термоупругими напряжениями в процессе нагрева её поверхности лазерным излучением от начальной температуры до температуры отжига.

Например, при воздействии в режиме свободной генерации условие термопрочности пластины излучением имеет вид:

$$\frac{\sigma_{BP}(1-\nu)}{E\alpha_T(T_f-T_0)} \geq f(\chi h, \rho), \qquad (1)$$

где $f(\chi h,\rho)$ – функция безразмерных параметров, характеризующих лазерное воздействие и условия накрытия пластины излучением; $\sigma_{ВР}$ – предел прочности материала пластины на растяжение; α_T – коэффициент линейного расширения материала пластины; ν – коэффициент Пуассона; E – модуль Юнга; T_f – температура отжига; T_0 – начальная температура; χ – показатель поглощения материала пластины на длине волны лазерного излучения; h – толщина пластины, ρ – отношение радиуса пятна лазерного излучения на поверхности пластины к её радиусу.

В рамках динамической задачи установлено, что условие термопрочности пластины зависит от временной формы лазерного импульса. Условие термопрочности в этом случае имеет вид:

$$2\sigma_{ВР}/[3K\alpha_T(T_f - T_0)] \geq f(\chi, C, \tau), \qquad (2)$$

где K – модуль всестороннего сжатия материала пластины; C – скорость звука в материале, τ – длительность лазерного импульса.

Если условия термопрочности не выполняются, из уравнений (1) и (2) находят значения начальной температуры пластины T_0, до которой необходимо предварительно нагреть пластину для его выполнения. Далее осуществляют предварительный нагрев пластины до требуемой температуры и осуществляют её лазерный отжиг. Для наносекундных лазерных импульсов при невыполнении условия (2) можно исходный лазерный импульс разделить на два импульса и осуществить задержку второго импульса на время воздействия первого. Рассмотренные варианты лазерного отжига позволяют осуществлять отжиг пластин в случаях, когда условие термопрочности пластины не выполняется.

Проведена экспериментальная проверка адекватности полученных соотношений.

Список литературы

1. Степанов А.Л. Лазерный отжиг диэлектриков с металлическими наночастицами // Оптика и спектроскопия. 2011. Т. 111. № 2. С. 245-249.

2. Коваленко А.Ф. Лазерный импульсный отжиг стеклянных пластин при частичном их накрытии излучением // Стекло и керамика. 2018. № 2. С. 27-31.

3. Коваленко А.Ф. Отжиг стеклообразных и керамических материалов наносекундными лазерными импульсами // Стекло и керамика. 2018. № 6. С. 37-42.

УДК 535(06)+004(06)

Н.А. ОРЕХОВА[1], Е.В. АБРАМЕНКО[1], М.А. МАРТЫНОВА[1], А.П. ЗАЖОГИН
Белорусский государственный университет, Минск
[1]Средняя школа № 64, Минск, Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОБОЯ СТАЛЕЙ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ

Методом лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектрометрии исследованы процессы пробивки нескольких марок сталей и метеорита Брагин. Результаты по легированным сталям позволяют определить среднюю скорость снимаемого слоя за импульс и оценить среднюю толщину пробиваемого слоя в железных и железокаменных метеоритах.

N.A. AREKHAVA[1], E.V. ABRAMENKO[1], M.A. MARTUNOVA[1], A.P. ZAJOGIN
Belarusian State University, Minsk
[1]Secondary School No. 64, Minsk, Belarus

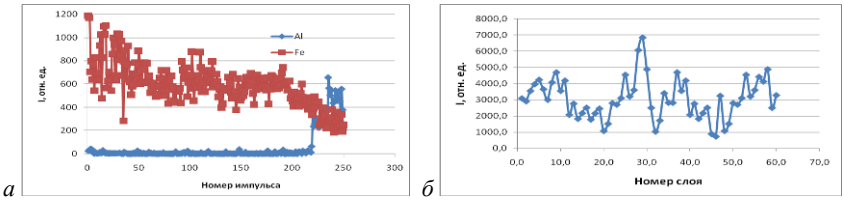
STUDY OF STEELS BREAKDOWN PROCESSES BY LASER ATOMIC EMISSION MULTICHANNEL SPECTROMETRY

The laser atomic emission multichannel spectrometry method was used to study the processes of punching several grades of steel and the Bragin meteorite. The results for alloyed steels allow us to determine the average speed of the layer being removed per pulse and to estimate the average thickness of the punched layer in iron and stony-iron meteorites.

Метеориты были и, несмотря на интенсивное развитие космических исследований, остаются ключевым, а часто и единственным источником информации о протопланетной и ранней планетной истории Солнечной системы. По составу все метеориты делят на три группы: каменные, железокаменные, железные. Железные преимущественно состоят из железа и никеля. Железокаменные метеориты состоят из примерно равных частей каменного (силикатного) и железистого (металлического) материала и представлены в основном двумя классами: мезосидериты и палласиты. Метеориты с валовым содержанием Ni 6 - 16 мас. % и к которым, в частности относится и Брагин, имеют видманштеттенову структуру и называются октаэдритами. Они образованы

пересекающимися пластинами камасита, ориентированными по плоскостям октаэдра (111) в тэните. Толщина камаситовых балок связана обратной зависимостью с валовым содержанием Ni и является основой для более детального подразделения октаэдритов на тонко-, средне- и грубо- и весьма грубоструктурные октаэдриты, с примерными размерами балок 0,6, 0,6 - 1,3, 1,3 - 3,3 и более 3,3 мм.

Целью настоящей работы являлась разработка методики оценки толщины балок в железных и железокаменных метеоритах типа Брагин методом лазерной атомно-эмиссионной спектрометрии. Для анализа использовался лазерный атомно-эмиссионный многоканальный спектрометр LSS-1. Длительность импульсов ≈ 15 нс. Лазерное излучение фокусируется на образец с помощью ахроматического конденсора с фокусным расстоянием 104 мм. Размер пятна фокусировки примерно 50 мкм, энергия импульсов 35 мДж, интервал между сдвоенными импульсами 10 мкс. Для более точного определения начала пробоя мишени стальная пластинка наклеивалась на подложку из алюминиевого сплав Д16Т. На рис. 1*а* в качестве примера приведена зависимость интенсивности линий железа и алюминия от номера импульса для образца трансформаторной стали марки 2412 с содержанием кремния порядка 3,8 %, толщина пластинки 0,35 мм.



а *б*

Рис. 1. Послойная зависимость интенсивности линий железа и алюминия от номера импульса в образце (*а*); линий железа в Брагине (*б*)

Аналогичным образом была изучена скорость пробоя для других образцов сплавов железа: кровельная сталь, сталь 2412 толщиной 0,51 мм. В качестве образца близкого по составу к метеоритам использована пластинка нержавеющей стали марки А2 (прокат). Содержание железа 65 - 70 %, никеля 10 - 12 %. Практически для всех легированных сталей средняя скорость абляции примерно равна 1,5 мкм. Для нелегированной кровельной стали значение несколько больше ≈ 1,7 - 1,75 мкм. С использованием полученных результатов оценены примерная толщина балок в метеорите Брагин (рис. 1*б*).

УДК 535(06)+004(06)

А.П. МЕЛЕХОВ, И.А. БУСЫГИНА, И.Г. ГРИГОРЬЕВА,
Е.Д. ВОВЧЕНКО, К.И. КОЗЛОВСКИЙ, Г.Х. САЛАХУТДИНОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

СПЕКТРАЛЬНЫЙ СОСТАВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ВАКУУМНОМ РАЗРЯДЕ С ЛАЗЕРНЫМ ИНИЦИИРОВАНИЕМ НА КАТОДЕ ИЛИ АНОДЕ

Приведены результаты исследования излучения плазмы вакуумного искрового разряда с лазерным инициированием в диапазоне мягкого рентгеновского излучения (0,2 ÷ 20 кэВ). Показано, что вид спектра зависит от полярности напряжения на инициирующем электроде-мишени. Достоверность результатов повышает применение комбинированной диагностики на основе вакуумного *pin-диода* и набора термолюминесцентных детекторов.

A.P. MELEKHOV, I.A. BUSYGINA, I.G. GRIGORYEVA,
E.D. VOVCHENKO, K.I. KOZLOVSKY, G.H. SALAKHUTDINOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

SPECTRAL COMPOSITION OF X-RAY RADIATION IN A VACUUM DISCHARGE WITH LASER INITIATION AT THE CATHODE OR ANODE

The results of a study of the radiation of a vacuum spark discharge plasma with laser initiation in the soft X-ray radiation range (0.2 ÷ 20 keV) are presented. It is shown that the type of spectrum depends on the polarity of the voltage on the initiating target electrode. The reliability of the results is increased by using combined diagnostics based on a vacuum *pin*-diode and a set of thermoluminescent detectors.

В качестве источника плотной горячей плазмы, интенсивно излучающей в рентгеновском диапазоне, можно использовать инициируемую лазером низкоиндуктивную вакуумную искру (НВИ) с умеренными разрядным током (≈ 10 кА) и энергозапасом в накопительном конденсаторе (≈ 20 Дж), но быстрым вводом энергии в разрядный промежуток [1 - 3]. Такой источник имеет простую конструкцию и удобен для применения в экспериментах по взаимодействия рентгеновского излучения (РИ) с веществом, поскольку позволяет изменять спектр РИ при варьировании энергии лазерного импульса, материала электродов, расстояния между электродами и разрядного тока.

Целью работы является экспериментальное исследование спектрального состава РИ в сильноточной (30 кА) НВИ для двух режимов разряда: с катодным и анодным инициированием. При этом фиксировались такие параметры как энергия лазера (100 мДж), емкость (0,22 мкФ) и напряжение (15 кВ) на накопительном конденсаторе, расстояние между электродами (10 мм), материал мишени (Cu). В экспериментах применялась комбинированная диагностика на основе вакуумного *pin*-диода и набора термолюминесцентных детекторов (ТЛД) с фильтрами поглощения.

Характерный вид импульсов РИ, зарегистрированных в радиальном направлении при различной полярности напряжения на разрядном промежутке, приведён на рис. 1. При катодном инициировании амплитуда выше, а импульс задерживается на меньшее время относительно момента образования инициирующей лазерной плазмы. Кроме различия в интенсивностях РИ на амплитуду импульсов влияет и то, что *pin*-диод «не видит» весь разрядный промежуток: остается в тени прианодная область, а именно там при анодном инициировании сосредоточена большая часть рентгеновского излучения.

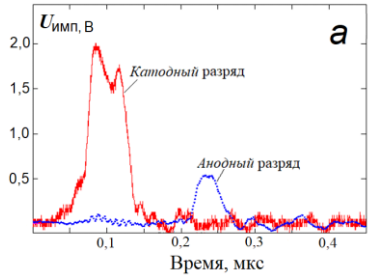


Рис. 1. Регистрация РИ с помощью *pin*-диода

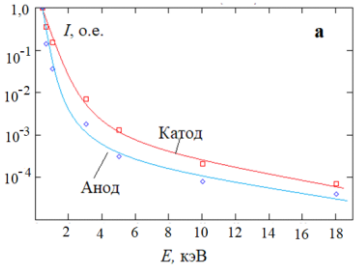


Рис. 2. Спектры РИ, зарегистрированные с помощью ТЛД

Спектральный состав РИ исследовался в аксиальном направлении с помощью двух одинаковых сборок из ТЛД, которые поочередно вставлялись в разрядный объём и облучались серией из 25 импульсов. Спектры РИ, восстановленные методом эффективных энергий по результатам измерений ТЛД, показаны на рис. 2. Спектры различны, причём при катодном инициировании интенсивность РИ выше.

Список литературы

1. Коробкин Ю.В., Романов И.В. и др. // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 9, С. 34-39.
2. Korobkin Yu.V., Paperny V.L, et al. // Plasm. Phys. and Control. Fusion. 2008. V. 50, P. 065002.
3. Alkhimova M.A., Vovchenko E.D., et al. // Nukleonika. 2015. V. 60 (2). P. 221-227.

УДК 535(06)+004(06)

М.Д. МОЖАЕВА[1,2], А.А. КОРШУНОВ[1,2], А.А. ГАРМАТИНА[2],
Е.И. МАРЕЕВ[2], В.Е. АСАДЧИКОВ[2], Н.В. МИНАЕВ[2]
[1]*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*
[2]*Институт фотонных технологий НИЦ «Курчатовский институт», Троицк*

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОТОКА РЕНТГЕНОВСКИХ ФОТОНОВ ПРИ СОЗДАНИИ МИКРОФОКУСНОГО ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОГО ИСТОЧНИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ГАЗОВЫХ СРЕД

Установлено, что генерация в условиях пониженного давления позволила более чем в 10 раз повысить выход рентгеновского излучения по сравнению с результатами в воздухе при аналогичных параметрах лазерного излучения.

M.D. MOZHAEVA[1,2], A.A. KORSHUNOV[1,2], A.A. GARMATINA[2],
E.I. MAREEV[2], V.E. ASADCHIKOV[2], N.V. MINAEV[2]
[1]*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*
[2]*Institute of Photon Technologies of NRC «Kurchatov Institute», Troitsk*

OPTIMIZATION OF X-RAY FLUX WHEN CREATING LASER-PLASMA MICROFOCUS SOURCE USING DIFFERENT GASEOUS MEDIA

We found that in vacuum chamber X-ray yield increases more than 10 times compared to the atmospheric conditions and the same parameters of the laser radiation.

Волоконные и твердотельные фемтосекундные лазерные системы с малой длительностью импульсов, высокой частотой и высокой средней мощностью имеют множество сфер применений, в том числе при создании лазерно-плазменных источников рентгеновского излучения для получения рентгеновских изображений [1]. При острой фокусировке излучения фемтосекундного низкоэнергетического высокочастотного лазера на поверхности твердотельной мишени можно получить интенсивность, достаточную для зажигания горячей плазмы и получения характеристических линий материала мишени, находящихся в рентгеновском спектральном диапазоне. Однако, интенсивность в области лазерной перетяжки, необходимая для возникновения рентгеновского излучения, превышает пороговую интенсивность ионизации воздуха, и возникают потери на ионизацию среды и дефокусировка лазерного пучка.

Это ограничивает интенсивность на поверхности мишени, снижает выход рентгеновского излучения и увеличивает размер источника [2]. Снизить влияние ионизации среды можно увеличив порог ионизации (генерация в среде инертного газа), либо уменьшив давление окружающего воздуха.

Целью данной работы является исследование влияния газовой среды на параметры микрофокусного лазерно-плазменного источника рентгеновского излучения.

В проведённых экспериментах использовался иттербиевый фемтосекундный волоконный лазер ТЕТА-20 ($\lambda = 1030$ нм, энергия в импульсе менее 100 мкДж, частота повторения 100, 200 кГц). В качестве мишени использовался медный цилиндр, вращающийся и циклически перемещающийся по вертикали (линия меди Kα – 8 кэВ).

Было установлено, что в воздухе выход рентгеновского излучения зависит от энергии лазерных импульсов как $E^{3,2}$ при энергиях ниже порогового значения, которое зависит от частоты. Выше порога зависимость отклоняется от кубической и выходит на плато вследствие ионизации воздуха. При подаче потока гелия в область лазерной перетяжки удалось снизить влияние ионизации и увеличить значение выхода рентгеновского излучения в насыщении в 1,5 раза по сравнению с результатами в воздухе. Также были проведены эксперименты по генерации рентгеновского излучения при пониженном давлении воздуха. Для этого был изготовлен компактный вакуумный бокс, позволяющий откачать воздух до давления в десятки мБарр. Были проведены измерения потока рентгеновских фотонов при частотах 50 - 200 кГц, в условиях нормального давления окружающего воздуха и понижения давления окружающей среды до ~ 100 мБарр. Было установлено, что при давлении 100 мБарр выход рентгеновского излучения увеличился более чем в 10 раз по сравнению с потоком при атмосферном давлении и тех же параметрах лазерного излучения. Максимальный выход рентгеновского излучения около 10^{10} фот/с/2πср.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки в рамках государственного задания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН и Минобрнауки РФ (грант № 075-15-2021-1362) в части проектирования микрофокусного источника рентгеновского излучения.

Список литературы

1. Garmatina A.l., et al. Vacuum-free femtosecond fiber laser microplasma X-ray source for radiography // Opt. Express.. 2023. V. 31, No. 26. P. 44259-44272.

2. Aleshkevich V.A., Gordienko V.M., Bravy B.G. Intensity delivery to the focal area with tight focusing of a femtosecond laser beam in a gas environment // J. Opt. Soc. Am. B. 2023. V. 40. No. 5. P. 1031.

УДК 535(06)+004(06)

К.Ф. ЕРМАЛИЦКАЯ, Е.С. ВОРОПАЙ, Н.Н. КРАСНОПЕРОВ, А.П. ЗАЖОГИН
Белорусский государственный университет, Минск

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАПЫЛЕНИЯ ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ НАНОПЛЁНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ ИЗ ОКСИДОВ ТИТАНА ПРИ ЛАЗЕРНОМ РАСПЫЛЕНИИ ТИТАНА В АТМОСФЕРЕ ВОЗДУХА

Исследованы возможности напыления газочувствительных наноплёночных резисторов из оксидов титана методом абляции сдвоенными лазерными импульсами мишени из титана марки ВТ1-0 на вырезанную в фольге фольгированного стеклотекстолита дорожку в атмосфере воздуха. Проведены исследования влияния энергии, количества импульсов и угла воздействия излучения на мишень на процессы при целенаправленном формировании компонентного и зарядового состава лазерного факела направляемого на подложку и качество плёнки.

K.F. ERMALITSKAIA, E.S. VOROPAY, N.N. KRASNOPEROV, A.P. ZAJOGIN
Belarusian State University, Minsk

STUDY OF THE PROCESSES OF DEPOSITION OF GAS-SENSITIVE NANOFILM RESISTORS FROM TITANIUM OXIDES BY LASER SPUTTERING OF TITANIUM IN AIR ATMOSPHERE

The possibilities of deposition of gas-sensitive nanofilm resistors from titanium oxides by the method of ablation with double laser pulses of a target made of VT1-0 titanium on a track cut in foil of foil-clad fiberglass in an air atmosphere were investigated. The influence of energy, number of pulses and angle of radiation impact on the target on the processes during targeted formation of the component and charge composition of the laser torch directed to the substrate and the quality of the film were studied.

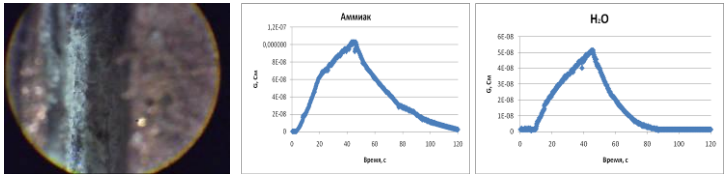
Улучшение функциональных характеристик химических газовых сенсоров может быть достигнуто за счёт использования в качестве газочувствительных материалов оксидов и оксидных композитов, для которых характерно изменение валентного состояния атомов металла при взаимодействии с молекулами детектируемого газа. Одним из важных

материалов для этой области являются оксиды титана. Тонкие плёнки оксидов титана в их различных модификациях имеют большое будущее в современных наукоемких технологиях.

Цель работы состояла в том, чтобы показать возможность получения методом абляции сериями сдвоенных лазерных импульсов титановой мишени в воздушной атмосфере наноплёнок из оксидов титана для использования их в качестве газовых сенсоров.

Для проведения исследований использовали лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1. В настоящей работе исследована динамика напыления наноплёнок оксидов титана при воздействии серий последовательных сдвоенных лазерных импульсов на мишень из титана марки ВТ1-0 при энергии импульсов 43 мДж, интервале между импульсами 10 мкс, от количества импульсов и углов падения лазерного излучения на мишень. Напыление наночастиц оксидов железа на полоску поверхности стеклотекстолита, шириной 300 мкм, вырезанной в фольгированном медью стеклотекстолите, проводилось при воздействии серии из 200 сдвоенных лазерных импульсов на мишень, установленную под углом 50 градусов к падающему излучению и подложке на расстоянии 3 мм. Энергия импульсов излучения 43 мДж, интервал между импульсами 10 мкс.

Изображение поверхности образца с напылённой плёнкой, увеличенное с помощью микроскопа Микмед в 200 раз, приведено на рис. 1*а*, на рис. 1*б*, *в* – отклики элемента на пары аммиака и воды. На рис. 1*а* светлая дорожка – оксиды титана, средний размер шариков составляет примерно 1 - 2 мкм. На боковой поверхности медной подложки видны шарообразные кластеры разного цвета



а *б* *в*

Рис. 1. Изображение поверхности элемента после напыления оксидов железа (*а*); зависимость изменения проводимости элемента от времени воздействия паров аммиака (*б*) и воды (*в*)

Сенсор работает при комнатной температуре, хорошо чувствует пары аммиака (рис. 1*б*), слабее пары воды (рис. 1*в*). Как видно из графика время отклика примерно равно 45 - 50 с. Время релаксации для паров аммиака примерно 60 с, а воды 25 с.

УДК 535(06)+004(06)

К.Ф. ЕРМАЛИЦКАЯ, Е.С. ВОРОПАЙ, Н.Н. КРАСНОПЕРОВ, А.П. ЗАЖОГИН
Белорусский государственный университет, Минск

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВОЙ МИШЕНИ СЕРИЯМИ СДВОЕННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В АТМОСФЕРЕ ВОЗДУХА

Изучено влияние энергии импульсов, величины расфокусировки лазерного пучка и количества сдвоенных лазерных импульсов на целенаправленное формирование развитой поверхности титановой мишени методом лазерной искровой спектрометрии (спектрометр LSS-1). Показана возможность формирования на поверхности мишени из титана наночастиц из оксидов титана сериями сдвоенных лазерных импульсов в воздушной атмосфере. Проведённые исследования показали, что отрицательная расфокусировка более благоприятна для формирования развитой поверхности.

K.F. ERMALITSKAIA, E.S. VOROPAY, N.N. KRASNOPEROV, A.P. ZAJOGIN
Belarusian State University, Minsk

STUDY OF OXIDE FORMATION PROCESSES DURING THE FORMATION OF A TITANIUM TARGET SURFACE SERIES OF DOUBLE LASER PULSES IN AIR

The effect of pulse energy, laser beam defocusing value and the number of double laser pulses on the targeted formation of a developed surface of a titanium target by the method of laser spark spectrometry (LSS-1 spectrometer) was studied. The possibility of forming titanium oxide nanoparticles on the surface of a titanium target series of double laser pulses in an air atmosphere was shown. The studies showed that negative defocusing is more favorable for the formation of a developed surface.

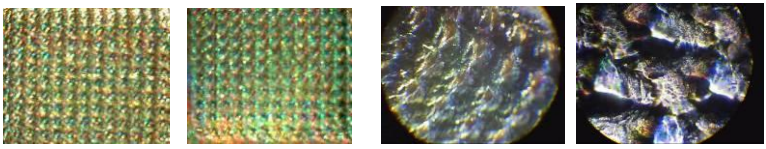
На сегодняшний день диоксид титана является одним из востребованных сорбентов и фотокатализаторов благодаря высокой фотокоррозионной устойчивости, малой стоимости и каталитической активности. В последнее десятилетие увеличился интерес к получению и изучению наноразмерных покрытий из диоксида титана на титане. Связано это с тем, что за счёт уменьшения размеров частиц возрастает удельная поверхность диоксида титана, что позволяет количественно

повысить число реакций, происходящих на поверхности. В связи с чем, получение наночастиц TiO_2 является одним из способов снижения степени рекомбинации зарядов и увеличения активной площади поверхности оксида.

Одним из перспективных способов является получение катализаторов в виде плёнок оксидов титана на развитой поверхности пластинки из титана при воздействии лазерных импульсов. Для получения структур на поверхности материала с минимальными размерами (десятки нанометров), используется режим воздействия короткими лазерными импульсами, с плотностью энергии импульса ниже порога абляции, но выше порога плавления, обеспечивающий процессы сверхбыстрого нагрева, плавления и рекристаллизации поверхности металла.

Для проведения исследований использовали лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1. Исследована динамика процессов формирования развитой поверхности, при воздействии серий последовательных сдвоенных лазерных импульсов на пластинки из титана. Для уменьшения плотности мощности воздействующей на поверхность использовался вариант расфокусировки лазерного пучка на ± 5 мм и при использовании низкоэнергетических импульсов 5 и 10 мДж. Интервал между сдвоенными импульсами 10 мкс. Использовались серии из 20 сдвоенных импульсов на отдельную точку.

Изображения поверхности оксидированного титана с нанесёнными плёнками, полученные с помощью оптического микроскопа Webbers, совмещённого с цифровой камерой (отражённый свет) и микроскопа Микромед, приведены на рис. 1.



а *б* *в* *г*

Рис. 1. Изображение поверхности оксидированного титана после обработки лазером по площади: энергия импульсов 5 мДж, расфокусировка – 5 мм (*а*) и +5 мм (*б*) (увеличение в 3 раза (*а, б*), в 120 (*в*) и 500 (*г*) раз)

Как видно из этих снимков на поверхности пластинки видна развитая структура. Островки имеют размер порядка нескольких десятков микрометров, покрытых тонким слоем окислов титана. Толщина оксидного слоя определяет цвет, который отражается от плёнки. Толщина слоёв изменяется примерно в пределах 10 - 100 нм.

М.В. РЕШЕТОВА[1,2], Е.О. ЕПИФАНОВ[2], Н.В. МИНАЕВ[2],
Ю. ЦВЕТИНОВИЧ[1], Д.А. ГОРИН[1]
[1]*Сколковский институт науки и технологий*
[2]*Институт фотонных технологий НИЦ «Курчатовский институт», Троицк*

ФОРМИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МИКРОСТРУКТУР ПОДОБНЫХ ДИАТОМОВЫМ ВОДОРОСЛЯМ МЕТОДОМ ДВУХФОТОННОЙ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ

Проведена адаптация и наладка установки фемтосекундной двухфотонной полимеризации для формирования функциональных микроструктур подобных биологическому объекту – диатомовым водорослям *Coscinodiscus oculus-iridis*. Конечной задачей работы является изготовление масштабированной модели диатомеи для проведения дальнейших исследований. С помощью технологии двухфотонной полимеризации создана модель с разрешением наименьшего фрагмента порядка 1 мкм.

M.V. RESHETOVA[1,2], E.O. EPIFANOV[2], N.V. MINAEV[2],
J. CVJETINOVIC[1], D.A. GORIN[1]
[1]*Skolkovo Institute of Science and Technology*
[2]*Institute of Photon Technologies of NRC «Kurchatov Institute», Troitsk*

FORMATION OF FUNCTIONAL MICROSTRUCTURES SIMILAR TO DIATOM ALGAE BY TWO-PHOTON POLYMERIZATION

The technology of femtosecond two-photon polymerization was adjusted to form functional microstructures similar to a biological object – the diatom algae *Coscinodiscus oculus-iridis*. The final objective of the work is to produce a scaled model of the diatom for further research. Using the technology of two-photon polymerization, a model with a resolution of the smallest fragment of about 1 μm was created.

Технология двухфотонной полимеризации относится к аддитивным технологиям и позволяет создавать сложные объёмные структуры на основе их 3D-моделей [1, 2]. Благодаря нелинейности процесса поглощения, область полимеризации (воксель) оказывается крайне компактной, что позволяет достигать микронного и субмикронного разрешения. В представляемой работе рассматривается применение

технологии для формирования микроструктур, дизайн которых основан на принципах строения диатомовых водорослей.

С древних времен человечество создавало изобретения, черпая вдохновение из различных природных объектов. В наши дни перенос идей и аналогий из биологии в технику, а также создание природоподобных технологий называется биомиметикой. Подробные исследования природных объектов могут быть использованы в этой области. Одним из таких объектов исследования являются диатомовые водоросли. В природе диатомеи представляют из себя одноклеточные микроводоросли с "панцирем" из диоксида кремния. Диатомовые водоросли могут быть разных размеров (от 2 до 2000 мкм) и разной формы. Такие объекты изучаются, например, в областях создания сенсоров и мембран [3]. Для фотоники особый интерес представляют свойства структур как сложных дифракционных элементов.

Размеры самых маленьких отверстий в "панцире" *Coscinodiscus oculus-iridis* порядка 30 нм. Технология двухфотонной полимеризации в нашей аппаратной реализации не даёт разрешения порядка десяти нанометров, но с её помощью можно создать увеличенную структуру, которую можно исследовать, например, в других частотных диапазонах. Создание искусственного биоподобного объекта обеспечивает возможность его повторного создания и позиционирования, что важно, например, при разработке биомиметических устройств.

Работа проводилась на установке двухфотонной полимеризации с использованием второй гармоники фемтосекундного лазера TEMA-100 (Авеста, Россия): $\lambda = 525$ нм, длительность импульса $t \sim 200$ фс, частота повторения $f = 70$ МГц. Поскольку стояла задача создания структуры с максимально высоким разрешением, то для печати использовался иммерсионный объектив с высокой кратностью и большой числовой апертурой (100x/ NA 1,4 Oil). Такой объектив дает недостаточно большое рабочее поле, поэтому для создания протяжённой структуры необходимо разбиение модели на небольшие элементы и затем печатать массив этих элементов.

Список литературы

1. Maruo S., Nakamura O., Kawata S. Three-dimensional microfabrication with two-photon-absorbed photopolymerization // Optics Letters. 1997. V. 22. No. 2.

2. Zhou X., Hou Y., Lin J., Zhou X., Hou Y., Lin J. A review on the processing accuracy of two-photon polymerization // AIP Advances. 2015. V. 5 (3). P. 030701.

3. Yang W. Diatoms: Self assembled silica nanostructures, and templates for bio/chemical sensors and biomimetic membranes // The Analyst. 2011. V. 136. No. 1.

УДК 535(06)+004(06)

Н.А. ОРЕХОВА[1], А.О. ПУХТЕЕВ[1], Р.А. ХАРИТОНЧИК[1],
А.П. ЗАЖОГИН
Белорусский государственный университет, Минск
[1]Средняя школа № 64, Минск, Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ ЖЕЛЕЗНЫХ МЕТЕОРИТОВ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ

Методом лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектрометрии изучено распределение железа и никеля в образцах железных метеоритов. Полученные данные, с большой вероятностью, подтверждают внеземное происхождение метеоритов и их связь с падениями обломков более крупных тел и которые были найдены вскоре после их падения на Землю.

N.A. AREKHAVA[1], A.O. PUKHTEEV[1], R.A. CHARITONCHIK[1],
A.P. ZAJOGIN
Belarusian State University, Minsk
[1]Secondary School No. 64, Minsk, Belarus

INVESTIGATIONS OF AN IRON METEORITE SAMPLE BY LASER ATOMIC EMISSION MULTICHANNEL SPECTROMETRY

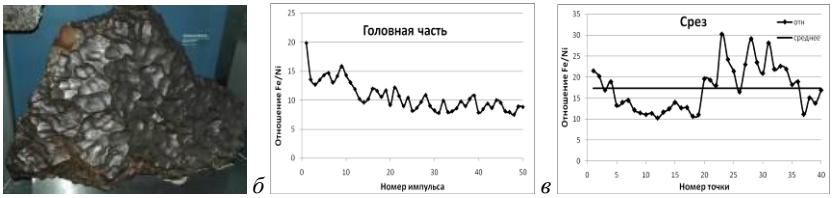
The distribution of iron and nickel in a sample of iron meteorite was studied by laser atomic emission multichannel spectrometry. The data obtained, with a high probability, confirm the extraterrestrial origin of the meteorite and its connection with the falling fragments of a larger body and which were found shortly after their fall to Earth.

Метеориты были и, несмотря на интенсивное развитие космических исследований, остаются ключевым, а часто и единственным источником информации о протопланетной и ранней планетной истории Солнечной системы. Современные исследования в области метеоритики, космохимии и планетологии свидетельствуют о существенной роли ударного метаморфизма в формировании и преобразовании космического вещества. Изучение признаков ударного метаморфизма в железных метеоритах позволяет получить сведения о характере структурно-минералогических и химических изменений метеоритного вещества как на ранних этапах

развития малых дифференцированных тел Солнечной системы, так и на современном этапе в результате его дробления и падения на Землю.

Целью настоящей работы являлось сравнительное изучение трёх образцов железных метеоритов путем оценки распределения железа и никеля по поверхности (рис. 1*а*) и глубине головной части и среза метеоритов методом лазерной атомно-эмиссионной спектрометрии. Для анализа использовался лазерный атомно-эмиссионный многоканальный спектрометр LSS-1. Размер пятна фокусировки примерно 50 мкм, энергия импульсов 35 мДж, количество сдвоенных импульсов 50. Для анализа использованы интенсивности линий Fe (404,58 нм) и Ni (349,3 нм).

Были определены средние значения содержания никеля: в образце 1 примерно 8,3 %, в образце 2 – 7,4 %, а в образце 3 – 5,2 %. Содержание никеля в образце 2 говорит о том, что это фрагмент железного метеорита, состоящего в основном из камасита – разновидности самородного железа, содержащего от 4 до 7,5 % никеля и встречающегося только в метеоритах. Определенное в работе относительно низкое среднее содержание никеля в образце 3 может быть связано с тем, что в железном метеорите Campodel Cielo есть области с различными минеральными включениями. Средний химический состав этого метеорита: 92,6 % железа, 6,68 % никеля, 0,43 % кобальта, 0,25 % фосфора. На рис. 1*б* представлены зависимости отношения интенсивностей линий Fe и Ni в спектрах головной части метеорита от номера импульса (среднее для трёх точек – на вершине и двух впадинах) и на рис. 1*в* от номера точки на поверхности среза.



а *б* *в*

Рис. 1. Снимок поверхности образца (*а*); отношение интенсивностей линий Fe/Ni в различных частях образца (*б*) и (*в*)

Анализ приведённых на рис. 1*б* результатов позволяет сделать вывод о том, что кора плавления преимущественно состоит из железа, а в более глубоких слоях количество никеля существенно увеличивается. Анализ приведённых на рис. 1*в* результатов распределения железа и никеля в срезе позволяет сделать предположение о наличии в объёме образца трёх типов октаэдритов: средне-, грубо- и весьма грубоструктурных.

УДК 535(06)+004(06)

Д.А. РАДНАТАРОВ, П.В. ЖУЛАНОВА, И.В. ГРОМОВ,
С.М. КОБЦЕВ
Новосибирский государственный университет

ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СВОБОДНОЙ ФОРМЫ МЕТОДОМ НАПРАВЛЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМОЙ

В работе представлены результаты исследования метода формирования поверхностей оптических элементов, основанного на направленном травлении холодной атмосферной плазмой. Данный метод обеспечивает сохранение оптической гладкости поверхности, что позволяет осуществлять её контроль с использованием оптических методов и точно изготавливать оптические элементы со сложной геометрией – элементы с поверхностями свободной формы.

D.A. RADNATAROV, P.V. ZHULANOVA, I.V. GROMOV,
S.M. KOBTSEV
Novosibirsk State University.

FORMATION OF FREEFORM OPTICAL SURFACES USING DIRECTED ETCHING WITH COLD PLASMA

This work presents the results of a study on a method for forming optical element surfaces based on directed etching with cold atmospheric plasma. This method ensures the preservation of optical smoothness, enabling surface control using optical techniques and the precise fabrication of optical components with complex geometries—freeform surfaces.

Оптические элементы с поверхностью свободной формы позволяют значительно расширить возможности управления световыми пучками, что делает их востребованными в таких областях, как оптика, фотоника, лазерные системы, медицина, телекоммуникации и других. Однако сложность их изготовления ограничивает широкое применение.

Целью данной работы является разработка технологии формирования оптически гладких поверхностей заданной формы из прозрачного акрила методом направленного травления холодной атмосферной плазмой.

Для генерации холодной атмосферной плазмы используется высоковольтный разряд в потоке атмосферного воздуха, приводящий к образованию активных ионов, которые химически воздействуют на обрабатываемый материал (рис. 1). Направленный поток плазмы

обеспечивает травление поверхности в локальной зоне, глубина которого определяется временем воздействия. Перемещение заготовки по заданной траектории с контролируемой скоростью позволяет формировать поверхность с требуемым профилем.

Особенностью метода является возможность оперативного контроля профиля поверхности оптическими методами. Для этого в состав экспериментальной установки интегрирован интерферометр Тьюмана-Грина, обеспечивающий высокую точность измерений на всех этапах обработки.

В ходе экспериментов продемонстрирована возможность изготовления оптических элементов с гладкой поверхностью диаметром до 20 мм и глубиной профиля до 10 мкм. Поверхности, обработанные холодной плазмой, сохраняют оптическое качество, что подтверждено интерферометрическими измерениями. Метод показал высокую стабильность и воспроизводимость, а также перспективы для дальнейшей оптимизации и масштабирования. Кроме того, планируется адаптация метода к травлению заготовок из оптического стекла, путем добавления в воздушную смесь фторсодержащих газов.

Разработанный метод формирования поверхностей свободной формы с использованием холодной атмосферной плазмы демонстрирует высокий потенциал для создания сложных оптических элементов с заданной геометрией. Благодаря сохранению оптической гладкости и возможности интеграции системы контроля профиля, метод может найти применение в области прецизионной оптики и оптического приборостроения.

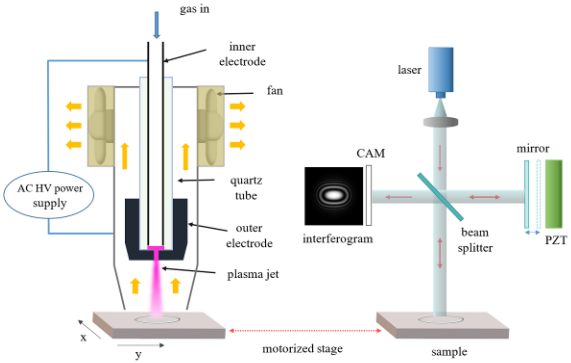


Рис. 1. Схема установки для формирования
и контроля оптических поверхностей свободной формы

УДК 535(06)+004(06)

Д.К. ДЕРИМЕДВЕДЬ[1,2,3], Е.И. МАРЕЕВ[3], Е.О. ЕПИФАНОВ[3], П.А. МИХАЛЕВ[2,3], Н.В. МИНАЕВ[3]

[1]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
[2]Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
[3]Институт фотонных технологий НИЦ «Курчатовский институт», Троицк

ПОЛУЧЕНИЕ МИКРОСТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЁНОК СОПОЛИМЕРОВ ВИНИЛИДЕНФТОРИДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ДИАПАЗОНА

Представлен экспериментальный стенд с наносекундным ультрафиолетовым источником лазерного излучения для микроструктурирования поверхности полимерных сегнетоэлектрических плёнок.

D.K. DERIMEDVED[1,2,3], E.I. MAREEV[3], E.O. EPIFANOV[3], P.A. MIKHALEV[2,3], N.V. MINAEV[3]

[1]National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
[2]Bauman Moscow State Technical University
[3]Institute of Photon Technologies of NRC «Kurchatov Institute»,Troitsk

ULTRAVIOLET LASER FABRICATION OF MICROSTRUCTURES ON THE SURFACE OF FERROELECTRIC FILMS OF VINYLIDENE FLUORIDE COPOLYMERS BY SHORT ULTRAVIOLET LASER PULSES

An experimental stand with a nanosecond ultraviolet laser radiation source for micropatterning the surface of polymer ferroelectric films is presented.

Изучение возможности высокоточной микрообработки сегнетоэлектрических полимерных плёночных материалов, в частности на основе поливинилиденфторида (ПВДФ) и его сополимера с тетрафторэтиленом (ТФЕ) крайне важно для создания медицинских микроустройств, функционирующих на основе электроактивных явлений [1]. Лазерная обработка – один из перспективных способов такой модификации. Исследуемые полимерные материалы обладают большим коэффициентом поглощения в коротковолновой области спектра [2], что позволяет локально воздействовать на материал без потери его

электроактивных свойств. Поэтому предлагается подробно исследовать процессы воздействия ультрафиолетового лазерного излучения при микрообработке сополимеров ВДФ. Благодаря развитию аппаратной базы, лазерные источники в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне становятся всё более доступными, особенно устройства для генерации третьей и, особенно, четвертой гармоники АИГ: Nd, которая находится в глубоком УФ-диапазоне [3]. Целью исследования является подготовка рабочего стенда для модификации плёночных сегнетоэлектрических полимерных материалов с использованием ультрафиолетового излучения.

В качестве сегнетоэлектрического материала подготовлены неполяризованные плёнки ПВДФ (PolyK, USA), а также ВДФ-ТФЭ (ГИПХ, Россия) толщиной 50 мкм. Для проведения работ собран экспериментальный стенд (рис. 1) с наносекундным источником излучения Tech-263: длина волны 263 нм, длительность 10 нс, частота до 1 кГц, энергия в импульсе до 25 мкДж (Лазер-Компакт, Россия) с использованием микроскопического объектива (LMU-10X-UVB, Thorlabs, США) для реализации прецизионной микрообработки с разрешением микронного масштаба.

Подобраны режимы работы источника излучения для формирования микроструктур. Планируется сравнение результатов обработки поверхности крупных плёночных образцов с конфигурацией, в которой будет использоваться гальваносканер и F-Theta объектив с рабочим полем 110 х 110 мм для совершенствования методов модификации полимерных сегнетоэлектрических материалов при разработке микродатчиков на их основе.

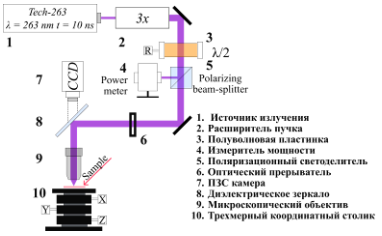


Рис. 1. Схема экспериментальной установки с микроскопическим объективом

Список литературы

1. Kochervinskii V.V., et al. // Russ. Chem. Rev. 2022. V. 91. No. 11. P. 5037.
2. Lee S., et al. // J. Micromechanics Microengineering. 2008. V. 18. No. 4. P. 045011.
3. Alamri S., Lasagni A.F. // Opt. Express. 2017. V. 25. No/ 9. P. 9603.

Е.В. ТИМЧЕНКО[1,2], Н.А. РЯБОВ[2], О.О. ФРОЛОВ[1],
П.Е. ТИМЧЕНКО[1,2], Л.Т. ВОЛОВА[2], С.С. ИВАНОВ[1]
[1]*Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева*
[2]*Самарский государственный медицинский университет*

ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СОСТАВА КОЛЛАГЕНСОДЕРЖАЩЕГО ГИДРОГЕЛЯ ДЛЯ 3D-БИОПЕЧАТИ ОПОРНЫХ И СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ ТКАНЕЙ

В исследовании представлены результаты применения спектроскопии комбинационного рассеяния для оценки коллагенсодержащего аллогенного гидрогеля, изготовленного в НИИ «БиоТех» по технологии «Лиопласт®». Проведён сравнительный спектральный анализ разработанного гидрогеля с существующими гидрогелями импортного производства «Rokit» и «Cellink». Установлено, что коллагеновая структура аллогенного гидрогеля сохраняется и имеет схожий спектральный состав с существующими гидрогелями.

E.V. TIMCHENKO[1,2], N.A. RYABOV[2], O.O. FROLOV[1],
P.E. TIMCHENKO[1,2], L.T. VOLOVA[2], S.S. IVANOV[1]
[1]*Samara National Research University*
[2]*Samara State Medical University*

OPTICAL METHODS FOR EVALUATING THE COMPOSITION OF COLLAGEN-CONTAINING HYDROGEL FOR 3D BIOPRINTING OF SUPPORTING CONNECTIVE TISSUES

The study presents the results of using Raman spectroscopy to evaluate a collagen allogeneic hydrogel manufactured at the Biotech Research Institute using Lioplast® technology. A comparative spectral analysis of the developed hydrogel with existing imported hydrogels Rokit and Cellink was conducted. It was found that the collagen structure of the allogeneic hydrogel is preserved and has a spectral composition similar to existing hydrogels.

Сегодня трёхмерная биопечать тканей и органов считается перспективным методом биопроизводства и вызывает большой интерес в области создания сложных клеточно-тканевых конструктов [1 - 3]. В исследовании [4], проведённом авторами, изучалось применение

спектроскопии комбинационного рассеяния для анализа состава тканей с подробным описанием основных линий КР.

Исследование включало четыре группы образцов: аллогенный коллагенсодержащий гидрогель, полученный из костной ткани человека, гидрогель PureCol® Cellink (Швеция), гидрогель INVIVO-GEL-ESSENTIAL (Корея) и образец коллагена I типа Cellink (Швеция).

Спектроскопия комбинационного рассеяния была выполнена с использованием экспериментального стенда, состоящего из полупроводникового лазера LML-785.0RB-04,450 мВт и спектрографа AndorSharmrockSR-303i. Анализ КР спектров проводился в диапазоне 700 - 1800 $см^{-1}$.

Обработка спектров КР включала фильтрацию автофлуоресценции методом I-ModPoly со степенью полинома 11 и нормализацию и сглаживание спектров КР методами SNV и Maximum Likeligood Estimation Savitzky-Golayfilter (MLE-SG) (=4).

В результате проведённых экспериментов установлено, что в составе исследуемых гидрогелей были идентифицированы линии КР, указывающие на наличие и сохранность коллагена в гидрогелях: Амид III (линии КР~1200 - 1300 $см^{-1}$), Амид II (линия КР~1554 $см^{-1}$), CH2 bending and scissoring modes of collagen and phospholipids ~1450 $см^{-1}$ и Амид I (линия КР~1650 - 1665 $см^{-1}$). Эти линии КР свидетельствуют о наличии и сохранности структуры коллагена в составе исследуемых гидрогелей.

Установлено, что коллагеновая структура аллогенного гидрогеля сохраняется и имеет схожий спектральный состав со существующими гидрогелями, что говорит о возможности использования предлагаемого аллогенного гидрогеля НИИ «БиоТех» в качестве альтернативы имеющимся на рынке аналогам биочернил в рамках реализации программы импортозамещения продуктов для 3D-биопечати.

Список литературы

1. Raees S., Ullah F., Javed F. Classification, processing, and applications of bioink and 3D bioprinting: A detailed review. International Journal of Biological Macromolecules // Physics Procedia. 2015. V. 73. P. 67-73.

2. Lomakin M.V, Filatova A.S, Soloshchanskii I.I. Guided bone regeneration in the reconstruction of the alveolar bone volume for dental implantation // Russian Stomatology –2011. V. 4 (5). – P. 15-18.

3. Tsiklin I.L., Pugachev E.I., Kolsanov A.V., Timchenko E.V., Boltovskaya V.V., Timchenko P.E., Volova L.T. Biopolymer material from human spongiosa for regenerative medicine application // Polymers. 2022, V. 14 (5). P. 9414.

4. Zhang Y., Ren L., Wang Q., Wen Z., Liu C., Ding Y. Raman Specrtoscopy: A Potential Diagnostic Tool for Oral Diseases, Front.Cell.Infect.Microbiol., 04 February 2022.

УДК 535(06)+004(06)

П.А. АЛЕШИНА[1,2], Г.С. РОГОЖНИКОВ[2]
[1]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (филиал), Саров, Нижегородская обл.
[2]Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Нижегородская обл.

МОДЕЛЬ ЭКСПРЕСС-КОАГУЛЯЦИИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ ИНТЕНСИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПРОЦЕДУРЫ ОПТИЧЕСКОЙ БИОПСИИ

Приведены результаты расчётно-теоретических исследований, связанных с возможностью добавления функции коагулятора в тонкоигольный зонд для проведения оптической биопсии. Проведена верификация модели с использованием лабораторных стендов.

P.A. ALESHINA[1,2], G.S. ROGOZHNIKOV[2]
[1]Sarov Branch of Lomonosov Moscow State University, Nizhny Novgorod region
[2]All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Nizhny Novgorod region

MODEL OF EXPRESS-COAGULATION OF BIOLOGICAL TISSUES BY MEANS OF INTENSE LASER RADIATION DURING OPTICAL BIOPSY PROCEDURE

Results of numerical calculation concerning the possibility of embedding coagulation functions into the thin-needle probe for optical biopsy have been provided. Verification of the model using laboratory installations has been carried out.

В последнее время активно развиваются методики оптической биопсии, когда в биопсийную иглу встраиваются оптические волокна, излучающие свет в биологическую ткань и собирающие рассеянное назад излучение для его последующего анализа и определения качественного и количественного состава содержащихся в ткани структур и веществ. Такие методики носят как навигационный, так и диагностический характер. На данный момент разработаны малотравматичные тонкоигольные оптические зонды, имеющие внешний диаметр менее миллиметра, что сопоставимо с размерами обычной инъекционной иглы. Однако, неважно, насколько тонкой является биопсийная игла, так как на её пути могут встретиться структуры сопоставимые с её диаметром кровеносные и лимфатические сосуды, капсулы паренхиматозных органов,

новообразований, кист, повреждение которых может грозить ухудшением состояния организма [1]. В настоящей работе было предложено использовать одно из волокон зонда для осуществления лазерной коагуляции тканей в процессе проведения биопсии в режимах, не снижающих информативность процедуры. Создана математическая модель взаимодействия такого зонда с тканями организма и проведена её верификация с использованием физических моделей и фантомов [2].

Список литературы

1. Астафьева Л.Г., Гаде Р., Шмидт В.Д. и др. // Оптика и спектроскопия. 2006.Т. 100. № 5. С .854-862.

2. Скрыбыкина А.А., Рогожников Г.С. // Ломоносов-2023. Москва, 2023.

УДК 535(06)+004(06)

А.А. КОРШУНОВ[1,2], М.Д. МОЖАЕВА[1,2], Ю.К. СЕДОВА[2],
Д.И. АШИХМИН[1,2], В.И. ЮСУПОВ[2], Н.В. МИНАЕВ[2],
А.С. ШАЛЕНОВ[1,2]
[1]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
[2]Институт фотонных технологий НИЦ «Курчатовский институт», Троицк

СОЗДАНИЕ КОМПАКТНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ИНЖЕНЕРИИ МИКРОБНЫХ СИСТЕМ

Приведены аспекты разработки компактной установки для лазерной инженерии микробных систем. Описаны ключевые конструктивные элементы, представлено описание электронной части и основных технических характеристик установки.

A.A. KORSHUNOV[1,2], M.D. MOZHAEVA[1,2], Yu.K. SEDOVA[1],
D.I. ASHIHMIN[1,2], V.I. YUSUPOV[1], N.V. MINAEV[1],
A.S. SHALENOV[1,2]
[1]National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
[2]Institute of Photon Technologies of NRC «Kurchatov Institute»,Troitsk

CREATION OF A COMPACT INSTALLATION FOR LASER ENGINEERING OF MICROBIAL SYSTEMS

Aspects of the development of a compact installation for laser engineering of microbial systems are presented. The key structural components are described, as well as a description of the electronic part of the installation.

В настоящее время источники лазерного излучения активно используются для решения актуальных задач науки, техники и биомедицины. В частности, в биомедицине помимо работы с биотканями лазерное излучение может применяется для задач, связанных с микробиологией и биоинженерией. Актуальной технологией для микробиологии является вариант лазерной биопечати – лазерная инженерия микробных систем (ЛИМС) [1 - 2]. Использование этой технологии позволяет изолировать микроорганизмы, которые в настоящее время являются некультивируемыми стандартным способом, или, например, отделять “неотделяемых” симбионтов. Создание мобильной установки ЛИМС является актуальной необходимостью, поскольку это позволит привлечь к исследованиям более широкие группы микробиологов.

В работе проводилось проектирование установки с использованием CAD системы. Конструкция установки основана на двух парах моторизированных подвижек, расположенных взаимно перпендикулярно. Они задают две плоскости перемещения для донорной (пластинки стекла с металлическим напылением, на которой находится слой гидрогеля с клетками) и акцепторной подложек. Управление подвижками происходит с помощью плат Duet2Wifi. В установке используется лазерный источник YLPM-1-4x200-20-20 с $\lambda = 1064$ нм и $\tau = 8$ нс. Излучение фокусируется на поглощающий металлический слой донорной подложки с помощью объектива. Разработано и апробировано на практике программное обеспечение для совмещения управления подвижками с лазерным источником. Управление может осуществляться в автоматическом режиме через WEB-интерфейс. При поглощении лазерного импульса вблизи интерфейса гидрогеля с металлическим слоем образуется быстро расширяющийся пузырёк, что приводит к возникновению струи и пространственному переносу микрокапли с живыми клетками. Объём переносимых капель задается энергией лазерного импульса и положением фокальной плоскости объектива.

Для реализации различных режимов биопечати были сконструированы и собраны две различные версии установки. В первой версии использовался микроскопический объектив 20 x N.A. 0.4, который обеспечивал диаметр лазерной перетяжки $2\omega_0 \sim 3{,}2$ мкм и глубину Релея $zR \sim 11$ мкм. Такая фокусировка подходит для формирования пиколитровых капель, однако требует повышенной точности установки донорной пластинки. Во второй версии применялся микрообъектив 2.5 x N.A. 0.08 с параметрами фокусировки $2\omega_0 \sim 26$ мкм, $zR \sim 690$ мкм, что обеспечивало высокую стабильность при формировании микрокапель объёмом 1 - 20 нм.

Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» с использованием оборудования Центра коллективного пользования.

Список литературы

1. Минаев Н.В., Жигарьков В.С., Чепцов В.С., Юсупов В.И. Лазерная инженерия микробных систем: новый инструмент для микробиологии // Оптика и спектроскопия. 2024. Т. 132. № 1. С. 97-104.

2. Минаев Н.В., Епифанов Е.О., Юсупов В.И. Установка для лазерной инженерии микробиологических систем // Приборы и техника эксперимента. 2021. № 3. С. 119-122.

Е.В. ТИМЧЕНКО[1,2], П.Е. ТИМЧЕНКО[1,2], М.С. АЛЕХИН[1],
Е.В. ПИСАРЕВА[1], М.Ю. ВЛАСОВ[1,2], О.О. ФРОЛОВ[1],
Н.А. КЛЕНОВА[1]
[1]*Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева*
[2]*Самарский государственный медицинский университет*

РАМАНОВСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ БАКТЕРИАЛЬНОЙ БИОЦЕЛЛЮЛОЗЫ В ПРОЦЕССЕ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

В работе представлены результаты исследований применения метода спектроскопия комбинационного рассеяния для оценки состава материалов на основе бактериальной целлюлозы в процессе их изготовления. В результате были установлены спектральные особенности исследуемых материалов и разработан алгоритм идентификации исследуемых образцов в процессе их изготовления. Показано, что с помощью метода спектроскопии КР можно проводить экспресс-анализ состава материалов на основе бактериальной целлюлозы в процессе их изготовления. Результаты исследований подтверждены микроскопическим анализом.

E.V. TIMCHENKO[1,2], P.E. TIMCHENKO[1,2], M.S. ALEKHIN[1],
E.V. PISAREVA[1], M.Yu. VLASOV[1,2], O.O. FROLOV[1],
N.A. KLENOVA[1]
[1]*Samara National Research University*
[2]*Samara State Medical University*

RAMAN SPECTROSCOPY FOR THE EVALUATION OF BACTERIAL CELLULOSE-BASED MATERIALS DURING THEIR MANUFACTURE

The paper presents the results of research on the use of Raman spectroscopy to evaluate the composition of materials based on bacterial cellulose in the manufacturing process. As a result, the spectral features of the studied materials were established and an algorithm for identifying the studied samples during their manufacture was developed. It is shown that using the Raman spectroscopy method, rapid analysis of the composition of materials based on bacterial cellulose can be carried out during their manufacture. The results of the research are confirmed by microscopic analysis.

Бактериальная целлюлоза (БЦ) является биополимером, производимым бактериями и способствует реэпителизации, стимулируя клеточную адгезию, пролиферацию, миграцию и дифференцировку, что

приводит к более быстрому заживлению ран в регенеративной медицине [1]. Тем не менее, для достижения оптимальной приживаемости комбинированных материалов на основе БЦ необходимо тщательно контролировать их состав в процессе их изготовления. В качестве методов контроля можно использовать такие методы, как микроскопический анализ [2, 3] и спектроскопию комбинационного рассеяния [4].

Цель данной работы заключается в применении рамановской спектроскопии для оценки состава материалов на основе бактериальной целлюлозы в процессе их изготовления.

В ходе исследований были проанализированы материалы на основе БЦ, содержащие добавки, такие как пектин, клотримазол и 1.3-диоктил-4-метилимидозалий бромид. Для получения бактериальной целлюлозы были культивированы ацетобактерии, полученные из культуры Medusomyces gisevii путем клонирования с посевом из разведения 1:100 000 на агаризованную среду HS (HestrinSchramm, 1954). Метод спектроскопии КР был реализован с использованием стенда, подробно описанного в работе [4]. Результаты исследований показали спектральные различия между группами бактериальной целлюлозы с добавлением пектина и без него, а также с добавлением 1.3-диоктил-4-метилимидозалий бромида и клотримазола, которые проявляются на линиях КР ~1745, 1591 и 1092 $см^{-1}$, соответствующие колебаниям бактериальной целлюлозы. В процессе изготовления и дальнейшего анализа было получено спектральное отличие образцов с клотримазолом и без, проявляющееся во всем исследуемом спектральном диапазоне от 800 - 1800 $см^{-1}$. При смешивании клотримозола и пектина спектры КР бактериальной целлюлозы становятся более сглаженными в диапазоне 1000 - 1262 $см^{-1}$ и 1420 - 1747 $см^{-1}$, что может свидетельствовать о том, что связь пектина и клотримазола могла повлиять на осаждение лекарственного средства в слое плёнки бактериальной целлюлозы. Данные результаты подтверждены микроскопическим анализом.

Разработан алгоритм идентификации исследуемых образцов в процессе их изготовления.

Список литературы

1. Reiniati I., Hrymak A.N. // Electronic Thesis and Dissertation Repository, 2017.

2. Skvortsova Z.N., Gromovykh T.I., et.al. // Colloidal Journal. 2019. V. 81. No. 4. P. 441-452.

3. Bolotova K.S., Chukhchin D.G.. // ISSN 0536 – 1036. IVUZ. «Lesnoi zhurnaL». 2016. № 6.

4. Timchenko P.E., Timchenko E.V., Volova L.T., et.al. // Optical Memory and Neural Networks. 2020. V. 29. No. 4. P. 354-357.

5. Zaharov V.P., Timchenko E.V., Timchenko P.E., et.al. // Computer Optics. 2011. V. 35 (2). P. 238-242.

УДК 535(06)+004(06)

Ю.В. ВОЙТЕШОНОК, Д.В. ШИТЦ
Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград

ПРЕИМУЩЕСТВА ОЗОНАТОРА НА ОСНОВЕ ЭКСИМЕРНОЙ ЛАМПЫ В ПРИБОРЕ ОБРАБОТКИ СЕПТИЧЕСКИХ РАН

Приведены результаты использования озонатора с замкнутой системой, где в качестве генератора озона используется эксимерная лампа. Концентрация озона при работе системы достигает значений 62 ppm. Озон генерируется путём облучения атмосферного воздуха УФ-излучением 172 нм. По сравнению с озонаторами электрического разряда, использование эксимерной лампы позволяет избежать генерации оксидов азота.

U.V. VOYTESHONOK, D.V. SCHITZ
Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad

ADVANTAGES EXCIMER LAMP-BASED OZONIZER IN A DEVICE FOR TREATMENT OF SEPTIC WOUNDS

The results of using an ozonizer with a closed system, where an excimer lamp is used as an ozone generator, are presented. The ozone concentration during system operation reaches 62 ppm. Ozone is generated by irradiating atmospheric air with 172 nm UV radiation. In comparison with electric discharge ozonizers, the use of an excimer lamp allows avoiding the generation of nitrogen oxides.

Озон обладает особыми свойствами [1], включая эффективность в качестве дезинфицирующего средства, донора кислорода, иммуномодулятора, индуктора антиоксидантных ферментов, усилителя метаболизма и индуктора эндотелиальной синтазы оксида азота. Лёгкость реакции озона с органическими веществами в роли окислителя позволяет использовать его как высокоэффективное дезинфицирующее средство. В отличие от антибиотиков и ультрафиолетового излучения озон действует через неспецифический механизм, обходя развитие привыкания (резистентности) у микроорганизмов, потому как озонирование приводит к окислению и разрушению бактериальных или грибковых клеточных мембран, без воздействия на их ДНК, как это происходит при использовании антибиотиков или УФ-излучения.

В фотохимических генераторах озона, где используется ультрафиолет на длине волны менее 200 нм (VUV диапазон) [2], излучение

характеризуется сильным поглощением кислорода, а энергия кванта достаточна для разложения O_2 на атомы кислорода и образования O_3 (рис. 1). Таким образом, ВУФ-излучение и три молекулы кислорода образуют две молекулы озона. Инертные газы, в том числе азот, прозрачны для данного диапазона, энергия излучения напрямую воздействует на кислород, достигая глубины поглощения в воздухе не более 5 мм. В сравнении с генераторами озона, основанными на электрическом разряде в воздухе, фотохимические генераторы позволяют избежать генерирование оксидов азота NO и NO_2, которые имеют высокую степень токсичности. В нормальных условиях кислород и азот не вступают в реакцию, это происходит при плазмохимических реакциях или нагреве воздуха более 1000 °C. Поэтому применяя газоразрядные озонаторы в медицинских целях необходимо использовать баллонный кислород, применение оптического озонатора эту необходимость исключает.

В качестве источника УФ-излучения выступает ксеноновая эксимерная DBD лампа (рис. 2) с внутренним электродом из алюминиевой фольги, на неё подано высокое импульсное напряжение, внешний сетчатый электрод заземлен. Общая мощность излучения эксимерной лампы в диапазоне VUV составила 1 Вт. Конструкция выполнена в соответствии с работами [3, 4].

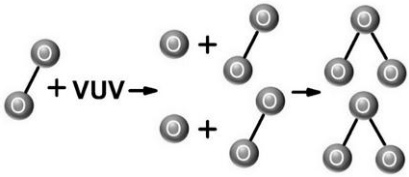


Рис. 1. Фотохимическая реакция образования озона

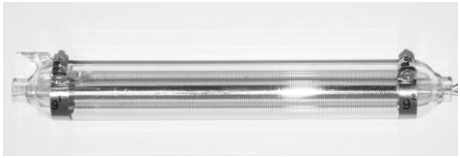


Рис. 2. DBD эксимерная лампа

Список литературы

1. Bocci V. The clinical application of ozone therapy. Preprint at https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7498916. 2010.

2. Kogelschatz U. Dielectric-barrier discharges: their history, discharge physics, and industrial applications // Plasma Chem. and Plasma Process. 2003. V. 23(1), P. 1-46.

3. Lomaev M.I., Skakun V.S., Tarasenko V.F., Schitz D.V. One and two–barrier excilamps on xenon dimers operating in the VUV rang // Tech. Phys. 2008. V. 53 (2). P. 244-248.

4. Lomaev M.I., Skakun V.S., Tarasenko V.F., Schitz D.V. Excilamps based on xenon dimers excited by a barrier discharge // J. of Optic. Technology. 2012. V. 79 (8). P. 498-502,

Е.В. ТИМЧЕНКО[1,2], П.Е. ТИМЧЕНКО[1,2], Л.Т. ВОЛОВА[2],
О.О. ФРОЛОВ[1], Е.С. СЕМИБРАТОВА[1]
[1]*Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева*
[2]*Самарский государственный медицинский университет*

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КАПСУЛЫ МОЧЕВОГО ПУЗЫРЯ ПОСЛЕ ПРОЦЕССА ЛИОФИЛИЗАЦИИ

Были изучены капсулы мочевого пузыря, подвергшиеся лиофилизации, с помощью метода спектроскопии комбинационного рассеяния. С помощью статистического анализа установлено отсутствие значительных спектральных различий между исследуемыми образцами. Показано, что лиофилизация, выполненная по технологии «ЛИОПЛАСТ», не приводит к существенным изменениям в составе и структуре капсул мочевого пузыря.

E.V. TIMCHENKO[1,2], P.E. TIMCHENKO[1,2], L.T. VOLOVA[2],
O.O. FROLOV[1], E.S. SEMIBRATOVA[1]
[1]*Samara National Research University*
[2]*Samara State Medical University*

SPECTRAL ANALYSIS OF THE BLADDER CAPSULE AFTER THE LYOPHILIZATION PROCESS

Lyophilized bladder capsules were studied using Raman spectroscopy. Statistical analysis revealed no significant spectral differences between the samples. It was shown that lyophilization using the LIOPLAST technology does not lead to significant changes in the composition and structure of bladder capsules.

На сегодняшний день анализ состава донорских материалов представляет собой важную задачу для дальнейшего их использования в регенеративной медицине [1]. Один из способов консервирования биологических продуктов является процесс лиофилизации. Тем не менее, изменения, происходящие в структуре биоматериалов после этого процесса, до сих пор не изучены в полной мере. В биомедицинских исследованиях широко применяются оптические методы, такие как рамановская спектроскопия. [2 - 4].

Основной целью данной работы является исследование капсулы мочевого пузыря после лиофилизации с помощью метода рамановской спектроскопии.

В исследовании применялись аллогенные капсулы мочевого пузыря, полученные от разных доноров. Размер каждой капсулы составлял 1.5 х 1.5 см ± 2 мм. Часть извлеченных биоматериалов была помещена в физиологический раствор с добавлением антибиотика и хранилась при температуре t = + 4°. В день проведения эксперимента образец был перенесен в дистиллированную воду, в то время как другая часть подверглась лиофилизации по технологии «ЛИОПЛАСТ» в соответствии с ТУ-9398-001-01963143-2004.

Исследуемые образцы были условно разбиты на две группы: нативные капсулы мочевого пузыря (I группа) и лиофилизированные капсулы мочевого пузыря (II группа), взятые у тех же доноров.

Для проведения рамановской спектроскопии использовался экспериментальный стенд, в который входят рамановский пробник RPB-785 и лазерный модуль LuxxMaster LML-785.0RB-04. Этот модуль способен выдавать мощность до 500 мВт и работать на длине волны 784.7 ± 0.05 нм. Также в состав стенда входит цифровой спектрометр Shamrock sr-303i, который обладает спектральным разрешением 0.15 нм и оснащен встроенной охлаждаемой камерой DV420A-OE. С его помощью были проанализированы рамановские спектры в диапазоне от 500 до 1800 $см^{-1}$. Обработка спектров проводилась с помощью программного обеспечения Wolfram Mathematica 12. Сначала с помощью сглаживающего усредняющего фильтра по 7 точкам удалялся шум, затем проводилась полиномная аппроксимация флуоресцентной составляющей спектра с использованием итерационного алгоритма. Для информативности спектров КР был использован метод нелинейного регрессионного анализа.

С помощью Рамановской спектроскопии и математической обработки установлено отсутствие значительных спектральных различий между исследуемыми образцами. Показано, что лиофилизация, выполненная по технологии «ЛИОПЛАСТ», не приводит к существенным изменениям в составе и структуре капсул мочевого пузыря.

Список литературы

1. Eppley B.L., Pietrzak W.S., Blandon M.W. // J. Craniofac. Surg. 2005. V. 16 (6). P. 981-989.
2. Mkrtechev O.V., Privalov V.E., et al. // SPbPU J. Phys. Math. 2015. V. 1 (213). P. 128-135.
3. Dolgikh G.I., Privalov V.E. // Laser Physics. 2016. P. 351.
4. Timchenko E.V., Pisareva E.V., et al // Opt. Spectrosc. 2020. V. 128(7). P. 989-997.

УДК 535(06)+004(06)

Д.С. ШУЛБАЕВА, А.А. СКРЫБЫКИНА, Г.С. РОГОЖНИКОВ
Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Нижегородская обл.

ОСОБЕННОСТИ ШИРОКОПОЛОСНОГО ОПТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ НОВООБРАЗОВАНИЙ У ЖИВОТНЫХ

Проведена разработка и исследование неинвазивного оптического диагностического зонда, позволяющего получать высокоинформативные данные о состоянии биологических тканей. Отработана процедура регистрации спектров отражения в широком оптическом диапазоне (400 - 2400 нм) от поверхностных новообразований у домашних животных, проходящих лечение в ветеринарной клинике.

D.S. SHULBAEVA, A.A. SKRYBYKINA, G.S. ROGOZHNIKOV
All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Nizhny Novgorod region

PECULIARITIES OF WIDE-BAND OPTICAL PROBING AND DATA ANALYSIS GATHERED DURING ANIMALS' SURFACE NEOPLASMS DIAGNOSTICS

Research and development of non-invasive optical probe for gathering highly-informative data concerning biological tissue status has been carried out. Procedure of reflection spectra registration in the wide optical range (400 - 2400 nm) from vet animals' surface neoplasms has been worked off.

Среди неинвазивных оптических методик диагностики заболеваний одной из наиболее популярных является регистрация спектров отражения от поражённой области с последующим анализом. Таким образом происходит проверка невусов, фиброзной ткани, полипов на злокачественность. Методика легко совместима с эндоскопическими и интраоперационными процедурами. Залогом высокой информативности методики является использование стабильного и светосильного широкополосного источника излучения, чувствительного и широкополосного спектрометра, а также калиброванных оптических волокон и коллимирующих узлов.

Разработан оптический диагностический зонд, позволяющий доставлять оптическое излучение как на поверхность биологической

ткани, так и на небольшое расстояние (до 2 мм) вглубь, и собирающий максимальное количество отражённого и рассеянного назад излучения для доставки в спектрометр. Зонд лёгок в обращении, стерилизуем, и настраивается для работы с различными типами тканей и в различных постановках исследовательских задач.

Зонд испытан в ветеринарной клинике (с письменного согласия владельцев) на домашних животных, имеющих поверхностные новообразования и проходящих лечение. Отработаны процедуры регистрации спектральных данных для повышения их информативности и удобства обработки.

Список литературы

1. Скрыбыкина А.А., Костромыкина В.В., Рогожников Г.С. // XII Международная конференция по фотонике и информационной оптике. М.: НИЯУ МИФИ, 2023.

2. Скрыбыкина А.А., Рогожников Г.С. // Ломоносов-2023. Москва, 2023.

3. Шулбаева Д.С., Клычков А.М., Рогожников Г.С. // XIII Международная конференция по фотонике и информационной оптике. М.: НИЯУ МИФИ, 2024.

А.А. РОМАНОВА[1,2], А.А. БЕЛЯЕВА[2], Е.А. БОГАТОВА[2,3],
С.П. ЧЕКМАСОВ[2], Г.С. БУДЫЛИН[4], Е.А. ШИРШИН[5],
В.А. АНДРЕЕВА[2], Н.Н. ЕВТИХИЕВ[1]

[1]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
[2]НТО «ИРЭ-Полюс», Фрязино
[3]Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный
[4]Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова
[5]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В IN VITRO МОДЕЛИ ПРОЦЕДУРЫ ЭНДОВЕНОЗНОЙ ЛАЗЕРНОЙ КОАГУЛЯЦИИ С РАДИАЛЬНЫМ ВОЛОКОННЫМ СВЕТОВОДОМ

Была собрана экспериментальная установка и смоделировано проведение процедуры эндовенозной лазерной коагуляции в лабораторных условиях. Получен график зависимости температуры волоконной брэгговской решётки и термопар от расстояния по мере продвижения волокна вдоль трубки.

A.A. ROMANOVA[1,2], A.A. BELYAEVA[2], E.A. BOGATOVA[2,3],
S.P. CHEKMASOV[2], G.S. BUDYLIN[4], E.A. SHIRSHIN[5],
V.A. ANDREEVA[2], N.N. EVTIKHIEV[1]

[1]National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
[2]NTO «IRE-Polus», Fryazino
[3]Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny
[4]Sechenov First Moscow State Medical University
[5]Lomonosov Moscow State University

OPTICAL METHOD FOR TEMPERATURE MEASUREMENT IN IN VITRO MODEL OF ENDOVENOUS LASER ABLATION PROCEDURE WITH RADIAL FIBER LIGHT GUIDE

An experimental setup was assembled, and the endovenous laser ablation was simulated in laboratory conditions. A graph temperature dependence fiber Bragg grating and thermocouples from the distance was obtained while the fiber moves along the tube.

Одно из важных направлений медицины, в котором используется лазерное излучение, – это эндовенозная лазерная коагуляция (ЭВЛК). Данная операция проводится для лечения варикозных вен нижних

конечностей и основана на термическом воздействии излучения внутри вены, вызывая облитерацию венозной стенки [1]. В диапазоне температур 70 - 85 °C происходит свертывание крови и сокращение содержащихся в стенке волокон коллагена, уменьшающих её диаметр, что обеспечивает трансформацию стенки вены в соединительные ткани [2, 3]. Однако, осложнения после ЭВЛК, такие как реканализация вен и перфорация стенки вены, снижают её эффективность и, как правило, возникают из-за нарушения температурного диапазона. Контроль температуры в процессе операции поможет избежать этих проблем, позволяя корректировать излучение для достижения нужной температуры стенки вены.

В данном методе измерения температуры была использована волоконная брэгговская решётка (ВБР) на конце радиального волокна. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. С помощью ранее полученного калибровочного графика (изменения центральной длины волны ВБР при нагреве решётки с помощью термостата), производился пересчёт центральной длины волны обратного отражения от ВБР в температуру ВБР и по полученным данным был построен график зависимости температур ВБР и четырёх термопар от расстояния по мере продвижения волокна вдоль трубки на рис. 2. Полученные результаты показывают схожесть температур между термопарами, закреплёнными во внутренней стенке трубки и ВБР на конце радиального волокна.

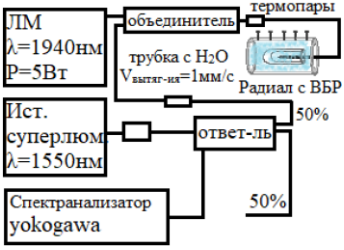


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

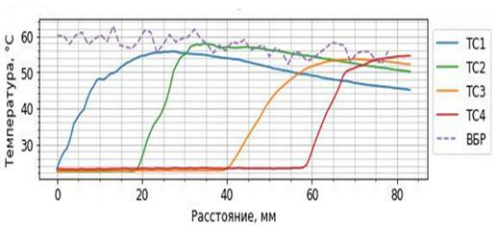


Рис. 2. График зависимости температуры, измеренной термопарами $TC_{1\text{-}4}$, и температуры ВБР от расстояния

Список литературы

1. Минаев В.Л. Лазерные медицинские системы и медицинские технологии на их основе. ИД Интеллект, 2020.

2. Belikov A.V., et.al. Controlling the temperature on the vein wall based on the analysis of the IR signal during endovasal laser treatment //Applied Sciences. 2022. V. 12. No. 10. P. 4925.

3. Viarengo L.M.A., et al. Endovenous laser treatment for varicose veins in patients with active ulcers: measurement of intravenous and perivenous temperatures during the procedure // Dermatologic surgery. 2007. V. 33. No. 10. P. 1234-1242.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. ЗОТОВА[1], Е.В. ТИМЧЕНКО[1,2], П.Е. ТИМЧЕНКО[1,2],
А.В. ЛЯМИН[2], И.В. БАЖУТОВА[2], К.А. КАЮМОВ[2],
О.О. ФРОЛОВ[1], Л.Т. ВОЛОВА[2], Д.А. ТРУНИН[2]
[1]*Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева*
[2]*Самарский государственный медицинский университет*

РАМАНОВСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ РАЗНЫХ ШТАММОВ СТРЕПТОКОККОВ

В работе представлены результаты экспериментов по идентификации трёх видов стрептококков Streptococcus mitis, Streptococcus oralis и Streptococcus pneumoniae с помощью метода спектроскопии комбинационного рассеяния. Были установлены спектральные отличия штаммов стрептококков, введены критерии для идентификации групп образцов на основе интенсивности усреднённых спектров КР.

A.V. ZOTOVA[1], E.V. TIMCHENKO[1,2], P.E. TIMCHENKO[1,2],
A.V. LYAMIN[2], I.V. BAZHUTOVA[2], K.A. KAYUMOV[2],
O.O. FROLOV[1], L.T. VOLOVA[2], D.A. TRUNIN[2]
[1]*Samara National Research University*
[2]*Samara State Medical University*

RAMAN SPECTROSCOPY FOR IDENTIFICATION OF DIFFERENT STRAINS OF STREPTOCOCCUS

The work presents the results of experiments on the identification of three species of streptococci: Streptococcus mitis, Streptococcus oralis, and Streptococcus pneumoniae using the method of combination scattering spectroscopy. Spectral differences between the strains of streptococci were established, and criteria for identifying groups of samples based on the intensity of averaged combination scattering spectra were introduced.

В последние годы широкое распространение приобрели различные воспалительные заболевания полости рта, в частности пародонтит. Одной из основных причин пародонтита и перимплантита является инфицирование полости рта микроорганизмами. Одним из известных потенциальных участников патологического процесса являются стрептококки, практически в 100 % случаев, выявляемые в пародонтальных карманах [1 - 3].

Целью работы являлось идентификация штаммов стрептококков Streptococcus mitis, Streptococcus oralis и Streptococcus pneumoniae методом спектроскопии комбинационного рассеяния (КР)

Объектами исследования являлись 4 штамма S.mitis, 4 штамма S.oralis и 3 штамма S.pneumoniae. Выращивание культур осуществлялось на 5 % кровяном агаре (HiMedia, Индия), с добавлением бараньей крови (ООО ГЕМ, Россия). Инкубирование посевов проводилось в микроаэрофильных условиях. Идентификация осуществлялась с использованием MALDI-ToFмасс-спектрометрии на приборе MicroflexLT (Bruker, Германия).

Спектры КР были получены с помощью спектрографа Sharmrock SR-303i с интегрированной цифровой камерой ANDOR DV-420A-OE (разрешение 0,15 нм по длине волны). Спектрограф также включает в себя полупроводниковый лазер (LML-785.0RB-04), оптический модуль КР (PBL 785, мощностью до 450 мВт). Нормализация спектров проводилась методом Extended multiplicative signal correction (EMSC). Сглаживание спектров осуществлялось методом Maximum Likelihood Estimation Savitzky-Golayfilter (MLE-SG) с параметром $\sigma = 4$.

Для исключения вклада автофлуоресценции был применён модифицированный метод вычитания флуоресцентной составляющей полиномиальной аппроксимацией Improved Modified Multi-Polynomial Fitting (ExModPoly) со степенью полинома 8. Анализ спектров КР проводился в диапазоне 450 - 1800 $см^{-1}$.

В результате исследований были установлены спектральные отличия штаммов S.mitis, S.oralis, S.pneumoniae, которые проявлялись на линиях КР ~527 $см^{-1}$ (S-S disulfidestret ching in proteins, Phosphatidylserine или ν(S-S) gauche-gauche-trans (amino acid cysteine)), 621 $см^{-1}$ (C-C twisting mode of phenylalanine (proteins)), 1280 $см^{-1}$ (Amide III, CH2 wagging vibrations from glycinebackbone или prolinesidechains), 1333 $см^{-1}$ (Guanine), 1445 $см^{-1}$ (CH2 bendingmodes, deformation C-H bendingproteins, deformation CH2/CH3 inlipids), 1525 $см^{-1}$ (Amide II), 1692 $см^{-1}$ (Stretching CO), 1749 $см^{-1}$ (C=O, lipids). Помимо этого, были введены критерии, позволяющие идентифицировать группы образцов на основе интенсивности линий усреднённых спектров КР и проведённого дискриминантного анализа.

Список литературы

1. Orekhova LYu. Diseasesof the Periodontium// Poli Media Press. 2004. P. 218-220.

2. Bazhutova I.V., Ismatullin D.D., Lyamin A.V., Trunin D.A. // Immunopathology, allergology, infectology. 2023. V. 1. P. 81-86.

3. Ismatullin D.D., Bochkareva P.V., Bazhutova I.V., Lyamin A.V., Galieva R.R., Zhestkov A.V., Zolotov M.O. // Russian Clinical Laboratory Diagnostics. 2023. V. 10 (68). P. 597-603.

УДК 535(06)+004(06)

С.П. КАРАМЫШЕВА, Л.В. СЕЛИВАНОВА, Е.В. УШАКОВА
Университет ИТМО, Санки-Петербург

ИЗУЧЕНИЕ ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОКРИСТАЛЛОВ ТРОЙНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЛЯ ФОТОДИНАМИЧЕСКИЙ ТЕРАПИИ

В данной работе описаны результаты эксперимента по выявлению закономерности фотокаталитических свойств нанокристаллов тройных соединений на основе серебра от дозы излучения, а также оценены перспективы применения их и уровень их эффективности в качестве фотосенсибилизатора для фотодинамической терапии рака.

S.P. KARAMYSHEVA, L.V. SELIVANOVA, E.V. USHAKOVA
ITMO University, Saint-Petersburg

INVESTIGATION OF PHOTOCATALYTIC PROPERTIES OF TERNARY NANOCRYSTALS FOR PHOTODYNAMIC THERAPY

This work describes the results of an experiment to identify the dependences of photocatalytic properties of silver-based ternary compound nanocrystals depending on the radiation dose, and also evaluates the prospects for their use and the level of their effectiveness as a photosensitizer for photodynamic cancer therapy.

На сегодняшний день на решение проблемы лечения раковых заболеваний без нанесения вреда здоровью организма крайне актуальна. Так на данный момент практикуются различные подобные методы для избавления от злокачественных образований: соно- и фотодинамическая терапия (ФДТ) [1]. ФДТ широко изучается среди исследователей-биомедиков и является одним из самых популярных приёмов борьбы с раком. Для её реализации важным является подбор правильного фотосенсибилизатора – вещества, способного под электромагнитным излучением генерировать активные формы кислорода (АФК) [2]. Именно эти АФК моментально взаимодействуют с органикой (в случае организма с раковыми клетками) и разлагают их на элементарные составляющие вплоть до воды и углекислого газа. Одним из видов таких фотосенсибилизаторов (ФС) являются биоразлагаемые и биосовместивые нанокристаллы (НК) тройных соединений, в состав которых входят серебро, индий, сера и иногда цинк [3].

В данной работе рассматривается три вида таких НК: $AgInS_2$ (AIS), $AgInS_2$ с оболочкой ZnS (AIS/ZnS) и $AgInS_2$, легированные иттербий-ионом (AIS:Yb). Зарегистрировать наличие АФК возможно с помощью специальных химических сенсоров таких, как, например, 1,3-дифенилизобензофуран (ДФБФ), изменение оптических свойств при реакции с АФК, которого и детектируются для регистрации их присутствия (рис. 1*а*).

В ходе данного эксперимента водная смесь из НК и ДФБФ (рис. 1*б*) подвергается различным дозам облучения с регистрацией спектров поглощения и фотолюминесценции с помощью методом спектрометрии. Проведя анализ изменения в спектрах поглощения и фотолюминесценции смеси ДФБФ и НК трёх видов, облучённых различными дозами излучения (405 нм), можно сказать, что AIS:Yb и AIS/ZnS являются наиболее эффективными ФС. Таким образом можно сделать вывод, что НК тройных соединений – перспективный материал для использования в биомедицине и, в частности, в ФДТ, так как являются эффективными ФС. Также эта способность к генерации АФК используется для фотокатализа, что расширяет применение такого материала.

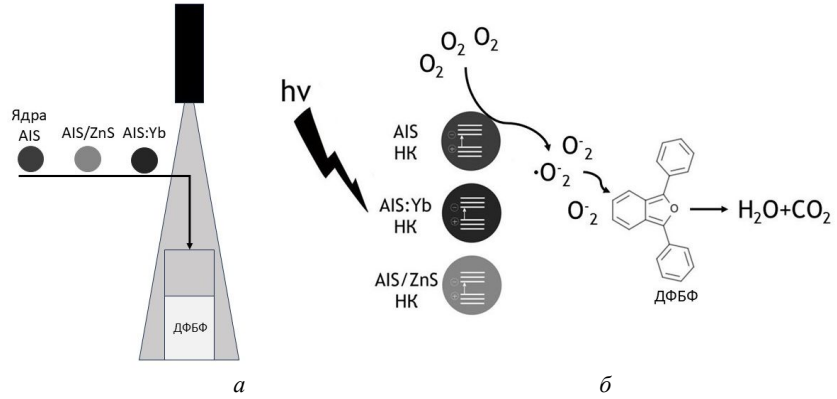


Рис. 1. Процедура проведения эксперимента (*а*) и механизм образования активных форм кислорода и их взаимодействие с химическим сенсором (*б*)

Список литературы

1. Mir Irshad A., Radhakrishanan V.S., et al. // Sci. Rep. 2018. V. 8 (1). P. 9322.
2. Cheng J., Wang W., et al. // Mat. Sci. and Eng. C. 2020. V. 107. P. 110324.
3. Mahshid H., Marilena L., et al. // norg. Chem. 2022. V. 61 (6). P. 2846-2863.

УДК 535(06)+004(06)

П.А. РУДИ[1,2], Г.С. РОГОЖНИКОВ[2]
[1]*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (филиал), Саров, Нижегородская обл.*
[2]*Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Нижегородская обл.*

МАКЕТ ТЕРАГЕРЦОВОГО СПЕКТРОМЕТРА ДЛЯ АНАЛИЗА СРЕЗОВ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ

Приведены результаты разработки макета терагерцового спектрометра, предназначенного для анализа срезов биологических тканей в диапазоне частот 0.139 - 0.141 ТГц. Выполнен расчёт оптической схемы в целом и каждого элемента схемы в отдельности. Проведена экспериментальная отработка макета на различных образцах срезов биологических тканей.

P.A. RUDI[1,2], G.S. ROGOZHNIKOV[2]
[1]*Sarov Branch of Lomonosov Moscow State University, Nizhny Novgorod region*
[2]*All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Nizhny Novgorod region*

MODEL OF TERAHERTZ SPECTROMETER FOR BIOLOGICAL TISSUE SLICES ANALYSIS

Results of terahertz spectrometer development for biological tissue slices analysis in the 0.139 - 0.141 THz frequency range have been provided. Calculation of the optical schematic in the whole and each element in particular has been carried out. Experimental testing of the model with different biological tissue slices has been fulfilled.

Миллиметровый диапазон длин волн долгое время не использовался в диагностике образцов биологической ткани из-за её чрезвычайной прозрачности для данного излучения. Однако, недавно были обнаружены участки спектра, в которых находятся одновременно колебательные резонансы жирных кислот, воды, а также некоторых сложных белковых соединений [1]. Это позволило реализовать идею терагерцового спектрометра, основанного на маломощном непрерывном излучении, зондирующем образец в диапазоне 0.139 - 0.141 ГГц с шагом 20 МГц. Оптическая схема спектрометра была разработана с учётом сохранения пространственного профиля зондирующего пучка по мере его распространения через элементы схемы и образец, а также сбора максимального количества излучения, прошедшего через образец,

высокочувствительным пироприёмником. Была проведена экспериментальная отработка макета спектрометра с использованием образцов различных биологических тканей толщиной от 500 мкм до 1 мм. Были найдены линии поглощения терагерцового излучения, позволившие как скомбинировать образцы тканей по общим признакам (например, содержание жировой ткани, соединительной ткани, наличие следов гемоглобина), так и дифференцировать их [2].

Список литературы

1. Руди П.А.. // Ломоносов-2024. Москва, 2024.
2. Smye S.W., Chamberlain J.M., et al. // Phys. Med. Biol. 2001. V. 46. P. R101-R112.

УДК 535(06)+004(06)

А.Ф. МАЛИКОВ[1], А.М. УДЕНЕЕВ[1], Д.В. ЯКОВЛЕВ[2],
Н.А. КАЛЯГИНА[1,2]
[1]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
[2]Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ФОТОВЫГОРАНИЕ ФОТОСЕНСИБИЛИЗАТОРОВ НА ПОВЕРХНОСТИ КОЖИ БИОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ EX VIVO ПРИ ОБЛУЧЕНИИ В КРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

Представлены и описаны результаты экспериментов по распределению и фотоличингу фотосенсибилизаторов на основе метиленового синего и хлорина е6 на поверхности здоровой и повреждённной кожи биологических моделей *ex vivo* при облучении в красном диапазоне длин волн с детектированием сигнала флуоресценции.

A.F. MALIKOV[1], A.M. UDENEEV[1], D.V. YAKOVLEV[2],
N.A. KALYAGINA[1,2]
[1]National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
[2]Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

DISTRIBUTION AND PHOTOBURNING OF PHOTOSENSITIZERS ON THE SKIN SURFACE OF EX VIVO BIOLOGICAL MODELS UNDER IRRADIATION IN THE RED WAVELENGTH RANGE

The results of experiments on the distribution and photobleaching of photosensitizers based on methylene blue and chlorin e6 on the surface of healthy and damaged skin of *ex vivo* biological models under irradiation in the red wavelength range with detection of a fluorescence signal are presented and described.

Антимикробная фотодинамическая терапия – это вид терапии, при которой используется свет в сочетании с фотосенсибилизирующим химическим веществом для вызывания гибели клеток патогенных микробов в тканях. Фотодинамическая терапия включает введение фотосенсибилизирующего агента, локализующегося в ране с последующей активацией агента светом определенной длины волны. В результате этой терапии происходит последовательность фотохимических и фотобиологических процессов, которые вызывают необратимое фотоповреждение бактерий [1, 2].

Целью работы является экспериментальное исследование накопления и фотовыгорания фотосенсибилизаторов на поверхности кожи биологического объекта и на ране биологического объекта типа модели *ex vivo* при облучении в красном диапазоне длин волн (660 нм) и видеофлуоресцентным наблюдением с подсветкой и возбуждением сигнала на длине волны 630 нм. Во время проведения испытаний исследовались свойства четырёх фотосенсибилизаторов (на основе метиленового синего и хлорина е6) как на неповреждённой, так и имеющей повреждения, поверхности кожи биологических моделей *ex vivo*.

В данной работе, были определены предварительные длительности процедуры для планирования проведения в дальнейшем антимикробной фотодинамической терапии на биологических моделях. Изучена разница выгорания между различными препаратами и разница скоростей выгорания на здоровой и повреждённой коже биологического объекта. Также были выявлены особенности распределения препаратов на здоровой и повреждённой коже.

Список литературы

1. Gonçalves A.S.C., Leitao M.M., Fernandes J.R., Saavedra M.J., Pereira C., Simoes M., Borges A. Photodynamic activation of phytochemical-antibiotic combinations for combatting Staphylococcus aureus from acute wound infections // Journal of Photochemistry & Photobiology B. 2024. V. 258. P. 112978.

2. Yuan Z., Lin C., He Y., Tao B., Chen M., Zhang J., Liu P., Cai Kaiyong. Near-infrared light-triggered nitric-oxide-enhanced photodynamic therapy and low-temperature photothermal therapy for biofilm elimination // ACS Nano. 2020. V. 14 (3). P. 3546-3562.

3. Shiryaev A., Ivankov M., Voitova A., Kalyagina N., Efendiev K., Pisareva T., Zavodnov S., Reshetov I., Loschenov V. Photodynamic therapy under diagnostic control of wounds with antibiotic-resistant microfora // Photonics. 2024. V. 11. P. 594.

УДК 535(06)+004(06)

И.Н. НИКОЛАЕВА[1,2,3], В.В. КОСТРОМЫКИНА[3],
Г.С. РОГОЖНИКОВ[3]
[1]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (филиал), Саров, Нижегородская обл.
[2]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
[3]Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Нижегородская обл.

СТРУКТУРИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДИЭЛЕКТРИКОВ КАК СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ИЗОБРАЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ ТЕРАГЕРЦОВОГО ВИДЕНИЯ

Показано как диэлектрические пластины с упорядоченным или разупорядоченным рельефом поверхности влияют на качество изображения, получаемого системой видения на основе непрерывного ТГц-источника и мультиспектральной ТГц-камеры. Приведены результаты экспериментальных исследований и их анализ.

I.N. NIKOLAEVA[1,2,3], V.V. KOSTROMYKINA[3],
G.S. ROGOZHNIKOV[3]
[1]Sarov Branch of Lomonosov Moscow State University, Nizhny Novgorod region
[2]Lomonosov Moscow State University
[3]All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Nizhny Novgorod region

STRUCTURING OF DIELECTRIC MATERIALS' SURFACES AS A METHOD OF IMAGE QUALITY CONTROL IN TERAHERTZ IMAGING SYSTEMS

Impact of dielectric slabs with ordered and disorded surface relief on image quality gathered by imaging system based on CW THz source and multispectral THz camera have been shown. Results of experimental research and analysis have been given.

Известно, что взаимодействие электромагнитного излучения, отражённого от объекта сложной геометрической формы, как с периодическими (упорядоченными) структурами, так и апериодическими (разупорядоченными), расположенными между системой видения и объектом, способно повысить информативность получаемых изображений [1]. На базе системы, состоящей из непрерывного терагерцового (ТГц) излучения миллиметрового диапазона длин волн (λ = 2.13 - 2.16 мм) и мультиспектральной ТГц-камеры разрешением 64 x 64 пикселя

исследовано влияние пластиковых пластин, изготовленных методом FDM-печати на качество передаваемых изображений. Результаты экспериментальных исследований верифицированы при помощи расчётных методик и могут быть использованы в интересах отработки методик неразрушающего контроля и машинного зрения при работе с изделиями сложной формы и композитного состава [2].

Список литературы

1. https://optics.org/news/15/10/34

2. Реушев М.Ю., Никитин С.Л. и др. // Успехи современной радиоэлектроники. 2019. № 12.

УДК 535(06)+004(06)

И.О. БАТУЕВ, К.А. СМИРНОВ, Т.В. МУРЗИНА,
А.И. МАЙДЫКОВСКИЙ
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ДВУХФОТОННАЯ ЛАЗЕРНАЯ ПЕЧАТЬ ВОЛНОВОДОВ И ШИРОКОПОЛОСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВВОДА И ВЫВОДА ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Методом двухфотонной лазерной печати изготовлены структуры, состоящие из коротких маломодовых волноводов и широкополосных элементов ввода-вывода излучения с эллиптической, параболической и плоской заводящей поверхностью. Оптические спектры пропускания системы изучены экспериментально и с помощью численного моделирования. Определена оптимальная конфигурация для разных видов используемого пучка: эллипсоидный адаптер для сфокусированного пучка, параболоидный адаптер для коллимированного пучка.

I.O. BATUEV, K.A. SMIRNOV, T.V. MURZINA,
A.I. MAYDYKOVSKY
Lomonosov Moscow State University

TWO-PHOTON LASER PRINTING OF WAVEGUIDES AND BROADBAND INPUT AND OUTPUT ELEMENTS OF OPTICAL RADIATION

Results of numerical simulations, two-photon lithography fabrication and spectral characteristics measurement of three-dimensional waveguide couplers based on quadric surfaces are presented. Optimal configurations for different kinds of radiation beams were determined: ellipsoid for focused beams and paraboloid for collimated beams.

Важной частью фотонных интегральных схем (ФИС) являются элементы ввода-вывода оптического излучения в волноводы. Известные методы включают в себя торцевое заведение, призменное заведение, заведение с помощью дифракционных решёток [1]. Актуальной задачей является создание широкополосных элементов ввода-вывода излучения.

Одним из наиболее эффективных является метод заведения на основе полного внутреннего отражения, который актуален как для плоских волноводов на поверхности, так и для свободно висящих волноводов [2]. Перспективными для проектирования адаптеров полного внутреннего отражения являются поверхности второго порядка, обладающие одним или двумя фокусами (эллипсоид, эллиптический параболоид) [3, 4].

Одним из подходящих методов изготовления таких сложных структур является двухфотонная лазерная литография (ДФЛЛ), позволяющая изготавливать произвольные трёхмерные структуры из фоторезиста [5].

Целью работы является численное моделирование методом FDTD и экспериментальное изучение спектральных характеристик элементов сопряжения излучения с волноводом на основе поверхностей второго порядка, изготовленных методом двухфотонной лазерной литографии. Экспериментальная установка по изготовлению структур методом ДФЛЛ приведена в [2].

На рис. 1 приведены спектры пропускания трёх видов адаптеров, рассчитанные методом FDTD. Наиболее подходящим для заведения сфокусированного излучения является адаптер на основе эллипсоида, коэффициент пропускания в диапазоне 0.7 - 2.4 мкм составил от 45 до 30 %. Для коллимированного пучка лучшие характеристики демонстрирует адаптер на основе эллиптического параболоида: коэффициент пропускания монотонно убывает от 40 до 15 % в том же спектральном диапазоне. На рис. 2 показаны изображения изготовленных методом ДФЛЛ структур, состоящих из двух адаптеров и волновода между ними. Экспериментально измеренные спектры пропускания хорошо согласуются с результатами численного моделирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 24-42-02009.

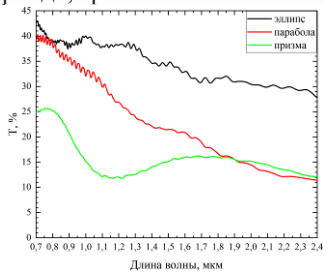


Рис. 1. Спектры пропускания для трёх видов адаптеров при s-поляризованном излучении накачки

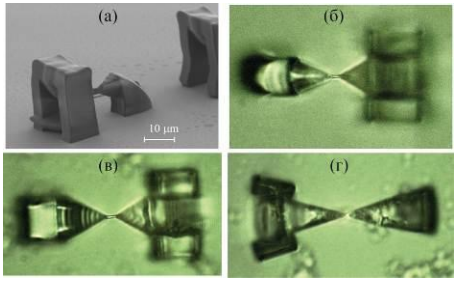


Рис. 2. СЭМ-изображение эллипсоидного адаптера (а). эллипсоидный (б), параболоидный (в), прямой (г) адаптеры в оптической микроскопии

Список литературы

1. Tamir T. Integrated Optics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1975. P. 83-137.
2. Maydykovskiy A.I., et al. // JETP Letters. 2023. V. 117. No. 1. P. 32-37.
3. Yu S., et al. // Journal of Lightwave Technology. 2020. V. 38. No. 13. P. 3358-3365.
4. Gehring H., et al. // APL Photonics. 2019. V. 4. No. 1.
5. Wang H., et al. // Advanced Functional Materials. 2023. V. 33. No. 39. P. 2214211.

УДК 535(06)+004(06)

Ф.И. СОЙФЕР
Московский технический университет связи и информатики

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ОПТИЧЕСКИЕ КАБЕЛИ БЕЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В КОНСТРУКЦИИ

Представлен анализ факторов, приводящих к повороту плоскости поляризации излучения, распространяющегося по неметаллическому оптоволоконному кабелю в сильном внешнем поле. Рассмотрены результаты экспериментов по передаче информации через диэлектрическое оптоволокно при приложении внешнего электромагнитного поля.

F.I. SOIFER
Moscow Technical University of Communications and Informatics

THE EFFECT OF ELECTROMAGNETIC FIELDS ON OPTICAL CABLES WITHOUT METAL ELEMENTS IN THE STRUCTURE

Presents the analysis of the factors leading to the rotation of the polarization plane of radiation propagating through a non-metallic fiber optic cable in a strong external field is presented. The results of experiments on the transmission of information through a dielectric optical fiber with the application of an external electromagnetic field are considered.

В связи с развитием технологий и цифровизацией каждый год прокладываются новые оптоволоконные трассы: уже сейчас общая длина имеющихся оптоволоконных линий превышает 1000000 км. В связи с широкой географией размещения волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), особый интерес представляет изучение влияния внешних электромагнитных воздействий (в частности, молний) на оптоволокно и параметры распространяющихся по нему пучков света или одиночных фотонов.

При проведении экспериментов, заключающихся в приложении электромагнитного поля различных порядков интенсивности к диэлектрическому оптоволоконному кабелю, проводящему оптические пучки, выясняется, что плоскость поляризации света на выходе отличается от первоначальной. Более того, при распространении двух пучков с разными длинами волн, плоскости их поляризаций повернутся на разные углы. Ответ на парадоксальный, на первый взгляд, результат прост:

несмотря на то, что внешнее поле не оказывает влияния на диэлектрик, оно взаимодействует с фотонами распространяющегося пучка [1].

Явление вращения плоскости поляризации может быть обусловлено двумя эффектами: эффектом Керра (под воздействием поперечного электрического поля) и эффектом Фарадея (под влиянием продольного магнитного). Эффекты являются независимыми друг от друга и могут влиять на пучок как вместе, так и по отдельности. Строго говоря, по порядкам величин влияние данных эффектов мало и может оцениваться как незначительная погрешность, однако при значениях поперечной составляющей магнитного поля порядка 10^5 - 10^6 В/м поворот плоскости поляризации под влиянием эффекта Керра становится значительным и не может быть проигнорирован. Видимый (достаточно большой для детектирования) поворот из-за эффекта Фарадея появляется при кратно меньших порядках величины значения напряжённости магнитного поля и, как правило, оказывается менее значительным, чем влияние керровского эффекта при одном и том же поле. В отличие от эффекта Керра, фарадеевское изменение угла вращения имеет нелинейную особенность: при отрицательных значениях магнитного поля зависит от эллиптичности распространяющегося по волокну света [2].

Удары молний по ВОЛС провоцируют очень быстрые изменения поляризации, которые могут вызывать нарушение работы когерентных систем связи. Именно поэтому изучение воздействий сильных полей на ВОЛС – достаточно актуальная проблема. В качестве одного из решений проблемы прерывания связи при попадании молнии в ВОЛС на сегодняшний день предлагается использование алгоритма быстрой компенсации вращения SOP с использованием оптимальной конструкции ОКГТ, способной ослаблять магнитное поле в оптических волокнах [3].

Список литературы

1. Соколов С. Воздействие внешних электромагнитных полей на полностью диэлектрические оптические кабели // Первая миля. 2013. № 3. С. 68-72.

2. Казакевич М.С., Дмитриев А.Л. Эффект Фарадея в волоконном световоде в ближней ИК-области спектра // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2004. №15.

3. Акопов С., Конышев В., Ниний О., Трещиков В., Убайдуллаев Р., Фролов И. Влияние молний на работу когерентных ВОЛС. // Первая миля. 2021. № 4. С. 24-30.

УДК 535(06)+004(06)

М.К. БРАЖНИКОВ[1,2], Н.П. ХАТЫРЕВ[1]
[1]Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская обл.
[2]Московский государственный университет геодезии и картографии

МЕТОДЫ КВАНТОВОЙ ОПТИКИ В ЗАДАЧАХ ИЗМЕРЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ ГАЗОВ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ

Работа посвящена анализу новейших применений методов квантовой оптики в области измерениях давления газов. Традиционные методы измерения давления обеспечивают высокую точность, но требуют значительных временных затрат и квалифицированного персонала. Для повышения точности и сокращения времени измерений разрабатываются современные методы квантовой оптики, работающие в широком диапазоне измерений, что позволяет применять их в различных областях науки и техники.

M.K. BRAZHNIKOV[1,2], N.P. KHATYREV[1]
[1]Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radioengineering, Mendeleevo, Moscow region
[2]Moscow State University of Geodesy and Cartography

METHODS OF QUANTUM OPTICS IN PROBLEMS OF GAS PRESSURE MEASUREMENTS IN A WIDE RANGE

The work is devoted to the analysis of the latest applications of quantum optics methods in the field of gas pressure measurements. Traditional pressure measurement methods provide high accuracy but require significant time and skilled personnel. To improve accuracy and reduce measurement time, modern quantum optics methods are being developed that operate over a wide range of measurements, allowing their application in various fields of science and technology.

Измерение давления – одни из самых востребованных видов измерений, как в научных исследованиях, так и в гражданской и специальной технике, охватывающий широкий диапазон значений давления (от 10^{-12} Па и ниже до высоких уровней давления 10^{3} МПа и выше). Единство и точность измерений давления в настоящее время обеспечивается первичными эталонами на основе грузопоршневых манометров, обеспечивающими наиболее точные и стабильные измерения этой величины. Однако, измерения с помощью таких манометров сложны, требуют существенных затрат времени и соблюдения жёстких условий эксплуатации, а также наличия квалифицированного, специально

обученного и опытного персонала. Кроме того, актуальным является сокращение времени, требуемого для выполнения таких измерений. Также, стоит учитывать, что такие манометры не позволяют измерять давление в области низкого и сверхвысокого давления. Путем решения данных проблем является применение принципиально новых современных методов измерений. К ним можно отнести использование квантовых оптических методов измерений. Именно эти методы сейчас развиваются и внедряются многими метрологическими институтами применительно к задаче повышения точности и сокращения времени измерений давления и плотности газа.

Для измерения давления в области сверхвысокого вакуума применяется эталона давления холодного атома (CAVS) [1]. Этот метод предполагает измерение скорости потери ультрахолодных атомов из ловушки в результате столкновений с молекулами фонового газа. В области традиционного диапазона давлений (от 10^{-6} до 10^{5} Па), применяются методы измерения с помощью резонатора Фабри-Перо и/или двойного резонатора Фабри–Перо [2], имеющего компенсационный канал. Недавно проведены исследования по оптическим методам измерений высоких уровней давления газов (от 10 Па до 10 МПа и выше). Метод измерений больших давлений основан на рэлеевском рассеянии в таких газах [3].

Список литературы

1. Scherschligt J., et al. Development of a new UHV/XHV pressure standard (cold atom vacuum standard) // Metrologia. 2017. V. 54. No. 6. P. S125.

2. Silander I., et al. Optical measurement of the gas number density in a Fabry–Perot cavity // Measurement science and technology. 2013. V. 24.No. 10. P. 105207.

3. Mari D., Pisani M., Francese C. Rayleigh scattering for pressure assessment // Measurement: Sensors. 2021. V. 18. P. 100253.

4. Pendrill L.R. Refractometry and gas density // Metrologia. 2004. V. 41. No. 2. P. S40.

5. Schmidt J.W., Gavioso R.M., May E.F., Moldover M.R. Polarizability of helium and gas metrology // Phys. Rev. Lett.. 2007. V. 98. P. 1-4.

6. Silander I., et al. Optical measurement of the gas number density in a Fabry–Perot cavity // Measurement science and technology. 2013. V. 24. No. 10. P. 105207.

7. Drever R.W.P., et al. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator // Applied Physics B. 1983. V. 31. P. 97-105.

8. Takei Y., et al. Challenges of an optical pressure standard in medium vacuum measurements // Measurement: Sensors. 2022. V. 22. P. 100371.

9. Бражников М.К., Хатырев Н.П. Измерения давления и плотности газов методами оптических частотных измерений // XIII международная конференция по фотонике и информационной оптике: сбор. научн. тр. М.: НИЯУ МИФИ. 2024. С. 591-592.

УДК 535(06)+004(06)

А.Д. КАЛЮНИН, Д.А. КЛЕПИКОВ, И.Ю. НОСОВ,
Н.В. ПЧЕЛКИНА
Московский технический университет связи и информатики

ОЦЕНКА ДОСТУПНОСТИ АТМОСФЕРНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ ДЛЯ МОСКВЫ

Проведён расчёт доступности атмосферной оптической линии связи для Москвы в районе расположения международного аэропорта Внуково им. А.Н. Туполева на основе многолетних измерений метеорологической дальности видимости и технических параметров нескольких серийных терминалов фирмы «МОСТКОМ» с помощью программного комплекса для расчёта энергетического бюджета беспроводного оптического канала связи.

A.D. KALYUNIN, D.A. KLEPIKOV, I.Yu. NOSOV,
N.V. PCHELKINA
Moscow Technical University of Communications and Informatics

ASSESSMENT OF THE AVAILABILITY OF ATMOSPHERIC OPTICAL COMMUNICATIONS FOR MOSCOW

The calculation of the availability of an atmospheric optical communication line for Moscow in the area of Vnukovo International Airport was carried out on the basis of long-term measurements of the meteorological visibility range and technical parameters of several serial terminals of the MOSTKOM company using a software package for calculating the energy budget of a wireless optical communication channel.

Организация и обеспечение работы надежной и высокоскоростной сети связи на объектах промышленности и инновационно-технологического бизнеса является актуальной задачей. Оценка перспективности применения технологии атмосферной оптической связи для Москвы и на промышленных объектах в разных регионах России проводилась в работах [1, 2]. При оценке уровня надежности атмосферной оптической линии связи (АОЛС) необходимо учитывать энергетический запас оборудования, метеоусловия географического региона и длину атмосферного канала.

Цель работы – оценить круглогодичную доступность атмосферной линии связи по данным метеостанций г. Москвы для создания карты применимости технологии АОЛС. Методика расчёта доступности АОЛС

приведена в работе [2], где климатические особенности местности определяются величиной метеорологической дальности видимости (МДВ). На основе этой методики в МТУСИ был разработан «Программный комплекс FSO» [3], использующий данные многолетних метеоизмерений и технические параметры российских терминалов атмосферной связи фирмы «МОСТКОМ» [4].

С помощью программного обеспечения [3] был проведён расчёт доступности для терминалов АОЛС по данным метеостанции [5], располагающейся на территории аэропорта Внуково им. А.Н. Туполева в Новомосковском административном округе Москвы. Были получены усреднённые значения МДВ в различное время суток за период с октября 2020 г. по октябрь 2024 г. (рис. 1), используя эти данные, были рассчитаны зависимости доступности атмосферного канала от дистанции до 1 км для трёх моделей терминалов M1 FE-S, M1 GE-S, M1 FE-2A (рис. 2) с разными скоростями передачи и рабочими дистанциями [4]. Для данных терминалов АОЛС с длиной атмосферного канала 500 м доступность превышает 0.92, при увеличении дистанции до 1 км – уменьшается до значений ниже 0.80. С учётом метеоособенностей данной местности и требований, которые будут предъявляться к АОЛС, можно подобрать оптимальную модель терминала.

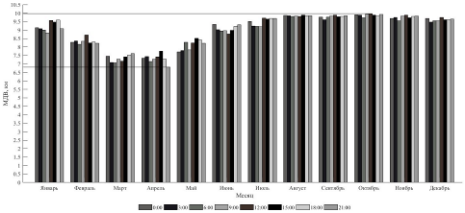


Рис. 1. Усреднённые значения МВД для каждого месяца

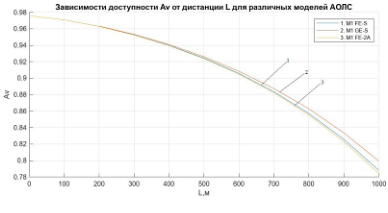


Рис. 2. Доступность терминалов АОЛС для дистанции 1 км

Список литературы

1. Пронин А.А., Пчелкина Н.В., Усачев К.П., Чиж С.А. // XII Межд. конференция по фотонике и информационной оптике: сб. науч. тр. М.: НИЯУ МИФИ, 2023. С. 526-527.

2. Казанцев С.Ю., Кузнецов С.Н., Максимов А.Ю., Пчелкина Н.В. // Усп. прикл. физ. 2023. Т. 11 (6). С. 530-539.

3. Сапожников М.В., Миронов Ю.Б., Терехин Д.Н., Казанцев С.Ю. Программный комплекс FSO. Св-во о рег. прогр. для ЭВМ RU 2024618934. Заявка от 17.04.2024.

4. МОСТКОМ: сайт. URL: http://www.moctkom.ru/optical-ground-stations.

5. Архив погоды в Москве (аэропорт во Внуково им. А.И. Туполева). https://rp5.ru.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. БАХУС, П.М. БОКОВ[1,2], Г.К. ДАНИЭЛС[2],
С.Ю. КАЗАНЦЕВ, М.В. САПОЖНИКОВ
Московский технический университет связи и информатики
[1]Северо-Западный университет, Почефструм, ЮАР
[2]Южно-Африканская корпорация по ядерной энергии, Пелиндаба, ЮАР

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АТМОСФЕРНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ НА ОБЪЕКТАХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ ЮАР

Представлены результаты анализа перспектив применения атмосферных оптических линий связи, защищённых по технологии квантового распределения ключей на ядерных объектах ЮАР. На основании открытых данных о погоде в районе расположении объектов использования атомной энергии проведены расчеты доступности атмосферной оптической связи при использовании оптических терминалов АО «МОСТКОМ».

A.V. BAKHUS, P.M. BOKOV[1,2], G.C. DANIELS[2],
S.Yu. KAZANTSEV, M.V. SAPOZHNIKOV
Moscow Technical University of Communications and Informatics
[1]North-West University, Potchefstroom, South Africa
[2]The South African Nuclear Energy Corporation SOC Ltd, Pelindaba, South Africa

ASSESSING THE APPLICABILITY OF USING ATMOSPHERIC OPTICAL COMMUNICATIONS AT THE SOUTH AFRICAN NUCLEAR FACILITIES

In this article an analysis of the prospects for the use of atmospheric optical communication lines, protected by quantum key distribution technology, at nuclear facilities in South Africa is done. Using open access, public weather data in the areas surrounding nuclear energy facilities, calculations were done to show the viability of atmospheric optical communication, using optical terminals of JSC «MOSTCOM».

Важным элементом безопасности объектов использования атомной энергии (ОИАЭ), является обеспечение высокоскоростной, защищённой связи, как внутри ОИАЭ, так и с внешним миром [1]. В работах [1, 2] была проанализирована целесообразность применения различных систем связи на ОИАЭ России, а в [3] были показана перспективность реализации атмосферных оптических линий связи (АОЛС), защищённых по технологии квантового распределения ключей (КРК) на ряде ОИАЭ

Европы. Важнейшим критерием, по которому принимается решение о целесообразности применения АОЛС на ОИАЭ, является оценка доступности (Av) атмосферной связи в течение календарного года. Расчёты [2] продемонстрировали высокую доступность АОЛС, базирующихся на применении терминалов АО «МОСТКОМ», на всех действующих АЭС России, Av на их территориях превышала 99 %.

Целью работы является анализ перспектив применения АОЛС на ОИАЭ ЮАР. Для достижения поставленной техники проводилось численное моделирование на основе методик описанных в [2, 3]. На основании открытых данных о погоде [4], получены зависимости доступности АОЛС для двух объектов ОИАЭ ЮАР, которые рассчитывались для трёх разных моделей терминалов АОЛС. Пример расчёта для АЭС «Коберг», расположенной в окрестностях города Кейптаун ЮАР приведён на рис. 1. Для оценки доступности квантового канала связи необходимы дополнительные экспериментальные исследования оптических потерь в сезоны, когда в воздухе присутствуют аэрозольное загрязнения, типичные для районов, где расположены ОИАЭ.

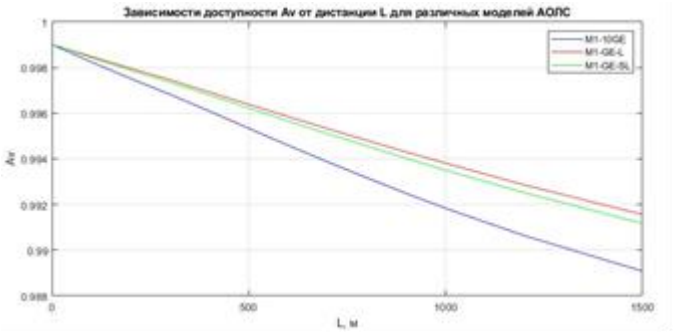


Рис. 1. Доступность АОЛС на территории АЭС «Коберг»

Список литературы

1. Казанцев С.Ю., Кузнецов С.Н., Максимов А.Ю., Пчелкина Н.В. // Успехи прикладной физики. 2023, Т. 11 (6). С. 530-539.

2. Казанцев С.Ю., Сапожников М.В., Терехин Д.Н. // Ядерная физика и инжиниринг. 2025. Т. 16. № 1. С. 5-12.

3. Kazantsev S.Yu., Kuznetsov S.N., Maksimov A.Yu., Pchelkina N.V. Prospects for the use of atmospheric optical communication at nuclear and fusion facilities // Fusion Science and Technology, 2024. V. 80 (7). P/ 893-903.

4. Weather archive in Cape Town International Airport, Lanseria International Airport. METAR. https://rp5.ru/.

УДК 535(06)+004(06)

Д.М. ПОНОМАРЕНКО[1,2], Д.М. БЕНГАЛЬСКИЙ[2], Д.Р. ХАРАСОВ[2], С.П. НИКИТИН[2], В.Н. ТРЕЩИКОВ[2]
[1]МИРЭА – Российский технологический университет, Москва
[2]Группа компаний «Т8», Москва

РАСПРЕДЕЛЁННЫЙ АКУСТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК С ЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ ЛИНИЕЙ, УДАЛЁННОЙ НА ДИСТАНЦИЮ 100 КИЛОМЕТРОВ

Продемонстрированно, что в распределённом акустическом датчике чувствительную волоконную линию длиной 50 км можно вынести на расстояние 100 км с помощью использования распределённых усилителей на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) и эрбиевых усилителей с удалённой накачкой (ROPA).

D.M. PONOMARENKO[1,2], D.M. BENGALSKII[2], D.R. KHARASOV[2], S.P. NIKITIN[2],V.N. TRESHCHIKOV
[1]MIREA – Russian Technological University, Moscow
[2]Company group «T8», Moscow

DISTRIBUTED ACOUSTIC SENSOR WITH REMOTE FIBER OPTIC LINE AT A DISTANCE OF 100 KILOMETERS

It has been demonstrated that in distributed acoustic sensor a 50 km long sensing fiber can be distanced at 100 km using distributed Raman and remotely optically pumped erbium doped amplifiers (ROPAs).

Для обеспечения мониторинга и охраны протяжённых периметров надземных и подводных объектов (железные дороги, трубопроводы, линии электропередач) активно используются распределённые акустические датчики (DAS), в основе которых лежит фазочувствительный когерентный рефлектометр (Ф-OTDR) [1, 2]. Максимальная длина чувствительного волокна определяется частотой зондирования. Например, для частоты зондирования ~ 2 кГц, максимальная длина линии составляет L = 50 км. Однако из-за потерь в волокне вынос 50 км чувствительного элемента на расстояние более 20 км от Ф-OTDR затруднена. В данной работе показано, что с помощью использования распределённых распределённых усилителей на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) и эрбиевых усилителей

с удалённой накачкой (ROPA) чувствительная линия может быть вынесена на 100 км от места установки оборудования.

На рис. 1 изображена схема экспериментальной установки. Для разделения чувствительного волокна 50 км и волокон доставки излучения по 100 км используется два циркулятора. В каждое волокно доставки с помощью спектрального уплотнителя вводилось излучение на длине волны 1,47 - 1,48 мкм мощностью 1.7 и 0.8 Вт. Излучение накачки использовалось для ВКР-усиления и накачки эрбиевого волокна активного ROPA с длинами 10 и 5 м. Удалось добиться уровня сигнал/шум рефлектограммы SNR_E [3] 10 дБ в конце линии (на 150-ом км), что является достаточным уровнем чувствительности для регистрации таких воздействий, как шаги человека. Далее в конце линии был подключён пьезоволоконный модулятор (PZT), где с его помощью производилось гармоническое растяжение ~ 80 м волокна на частоте 30 Гц с амплитудой воздействия $\Delta\varphi = 1$ рад или $\Delta\varepsilon = 1{,}5$ наностренов [4]. На рис. 2 построена временная пространственная диаграмма отклика DAS на воздействие PZT при частоте опроса 2 кГц. Диаграмма получена с использованием фильтра Баттерворта пятого порядка с полосой пропускания 20 - 40 Гц. Сигнал воздействия хорошо различим. Отношение сигнал/шум фазы составило 40 дБ в полосе 1 Гц.

Таким образом показано, что с помощью технологий Ф-OTDR, ВКР и ROPA можно сделать распределённый акустический датчик с полосой 1 кГц и дальностью работы 150 км.

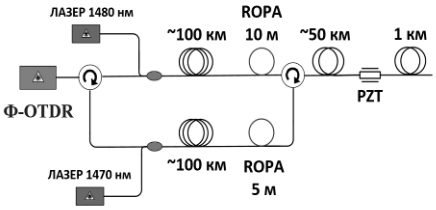


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

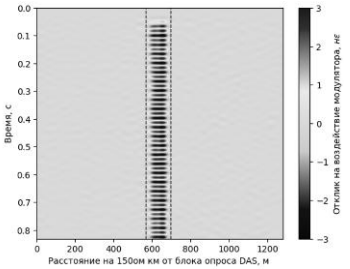


Рис. 2. Воздействие модулятора на 150-ом км от Ф-OTDR

Список литературы

1. Wang Z., et al. // Sensors. 2020. V. 20. No. 22. P. 6594.
2. Cao W // Wave Motion. 2024. V. 126. P. 103264.
3. Nikitin S., et al. // Journal of Lightwave Technology. 2020. V. 38. No. 6. P. 1446-1453.
4. Дудин А.С. и др.// Pribory i tehnika èksperimenta. 2023. No.5. P. 92-98.

УДК 535(06)+004(06)

А.К. НАНИДЖАНЯН, К.Ю. ЕРОХИН, М.А. ЯРЫГИН,
С.В. ПАВЛОВ
Московский технический университет связи и информатики

БЮДЖЕТ КВАНТОВОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ ОПТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ АТМОСФЕРЫ НА ПЕРЕДАЧУ КВАНТОВОГО КЛЮЧА

Приведены результаты экспериментов по исследованию влияния затухания на характеристики квантового канала технологии квантового распределения ключей. Получены зависимости коэффициента квантовых битовых ошибок (QBER) и скорости генерации просеянного ключа за сеанс связи от затухания.

A.K. NANIDZHANYAN, K.Yu. EROKHIN, M.A. YARYGIN,
S.V. PAVLOV[1]
Moscow Technical University of Communications and informatics

ENERGY BUDGET OF THE QUANTUM CHANNEL OF THE TEST BENCH FOR INVESTIGATION OF DISTURBANCE INFLUENCES OF AN OPTICAL DESTINY OF THE ATMOSPHERE ON QUANTUM KEY DISTRIBUTION

The results of experiments on the investigation of the influence of the attenuation on the characteristics of the quantum channel of quantum key distribution technology are presented. Dependences of quantum bit error rate (QBER) and the generation rate of the sifted key per communication session on the attenuation are obtained.

Альтернативным вариантом реализации квантового распределения ключей (КРК) в волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) является передача квантовых данных через атмосферные оптические линии связи (АОЛС). При передаче сигналов в атмосфере могут возникнуть различные атмосферные возмущения, увеличивающие потери, борьба с которыми усложняет базовый аппаратный комплекс. Для исследования подобных задач разработан научно-образовательный комплекс [1], который позволяет оценить вклад различного рода потерь на основные характеристики и параметры атмосферного канала.

Целью работы является физическое моделирование внешних влияний на волоконно-оптическую линию связи в системе КРК и исследование их

влияния на характеристики квантового канала. На данном стенде реализована двухпроходная схема «Plug&Play» на основе фазового кодирования по протоколу BB84 [2] с синхронизацией по оптическому синхродетектору. Более подробное описание методик отработки воздействий возмущений на оптический атмосферный канал экспериментальной установки содержится в [3, 4]. В роли источника затухания выступает переменный аттенюатор.

Были получены зависимости среднего QBER (рис. 1) и средней скорости генерации просеянного ключа (рис. 2) за сеанс связи при установленных на переменном аттенюаторе значений затухания от 0 до 20 дБ с шагом в 4 дБ. Установлено, что при увеличении затухания в квантовом канале, средний QBER значительно возрастает, в то время как средняя скорость выработки просеянного ключа сильно падает.

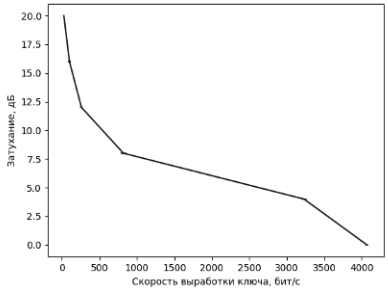


Рис. 1. Зависимость средней скорости выработки просеянного ключа от затухания

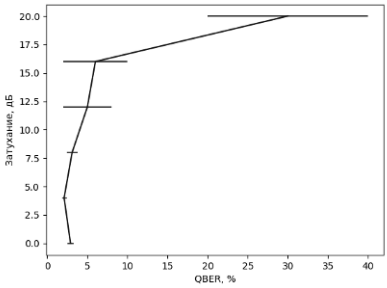


Рис. 2. Зависимость среднего QBER от затухания

Список литературы

1. Ерохин К.Ю., Казанцев С.Ю., Казиева Т.В., Пчелкина Н.В. // Всероссийская научная конференция с международным участием: сбор. науч. тр. Санкт-Петербург, 2023. С. 182.

2. Hjelme D.R., Lydersen L, Makarov V. // A Multidisciplinary Introduction to Information Security. 2011. P. 72-92.

3. Наниджанян А.К., Жуковский Д.Д., Казанцев С.Ю. // Современная педагогика и научные исследования в образовательной организации высшего образования // Материалы Всероссийской научно-методической конференции. 2024. С. 32-38.

4. Pchelkina N.V., Zhukovsky D.D., Nanidzhanyan A.K., et al. // 2024 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). 2024. P. 1-7.

УДК 535(06)+004(06)

Д.Д. РЕШЕТНИКОВ, Е.А. ВАШУКЕВИЧ, Т.Ю. ГОЛУБЕВА, В.М. ПЕТРОВ
Санкт-Петербургский государственный университет

ОЦЕНКА СКОРОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЕКРЕТНОГО КЛЮЧА В СПУТНИКОВОМ КАНАЛЕ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ ПУЧКОВ С АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ СТРУКТУРОЙ

Приводится оценка скорости распределения секретного ключа в квантовом криптографическом протоколе на основе оптических вихрей с аксиально-симметричной структурой поляризации. Оценка строится в рамках метода усиления криптографической стойкости протокола при помощи состояний-ловушек с учётом особенностей протокола, характеристик используемого оборудования и параметров оптической схемы. Полученные оценки позволяют говорить о применимости исследуемого протокола квантового распределения ключа в системах связи спутник-спутник и спутник-земля.

D.D. RESHETNIKOV, E.A. VASHUKEVICH, T.Yu. GOLUBEVA, V.M. PETROV
Saint-Petersburg State University

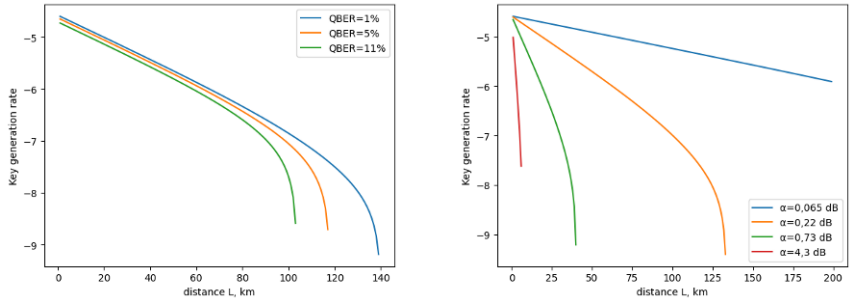
ESTIMATION OF THE SECRET KEY DISTRIBUTION RATE IN A SATELLITE COMMUNICATION CHANNEL BASED ON BEAMS WITH AN AXIALLY SYMMETRIC POLARIZATION STRUCTURE

The estimation of the secret key distribution rate in a quantum cryptographic protocol based on optical vortices with an axially symmetric polarization structure is given. The assessment is based on the method of increasing the cryptographic strength of the protocol using decoy states method, taking into account the features of the protocol, the characteristics of the equipment used and the parameters of the optical setup. The estimates obtained allow us to speak about the applicability of the studied quantum key distribution protocol in satellite-satellite and satellite-earth communication systems.

Системы квантовой криптографии или квантового распределения ключа (КРК) успешно решают одну из ключевых проблем в симметричной криптографии – распределение общего секретного ключа между двумя агентами по доступному для третьих лиц квантовому и

вспомогательному классическому каналам связи [1, 2]. Перспективным ресурсом для систем связи в свободном пространстве являются оптические пучки с аксиально-симметричной поляризационной структурой. Возможность их использования в спутниковых системах связи была показана в работе [3], а в работах [4, 5] был предложен протокол КРК, позволяющий отказаться от процедуры синхронизации плоскостей поляризации передающего и принимающего устройств.

Теоретическая оценка скорости генерации ключа в протоколе КРК на основе аксиально-симметричных поляризационных пучков и состояний-ловушек построена на основе особенностей протокола, реальных характеристик оборудования и экспериментально полученных параметров схемы генерации аксиально-симметричных поляризационных пучков (рис. 1).



а *б*

Рис. 1. Зависимость десятичного логарифма скорости распределения ключа от длины атмосферной трассы при различных значениях QBER, величина потерь α = 0.2 (*а*); различных атмосферных условиях, величина QBER = 1 % (*б*)

Полученные зависимости значений скорости распределения ключа позволяют говорить о существенной зависимости от погодных условий в канале связи. При этом полученные значения, в сравнении с характеристиками существующих систем, позволяют говорить об эффективности применения протокола КРК в системах связи спутник-спутник и спутник-земля.

Список литературы

1. Pirandola S., et al. // Adv. Opt. Photon. 2020. V. 12. P. 1012-1236.
2. Zapatero V., van Leent T., Arnon-Friedman R., et al. // npj Quantum Inf. 2023. V. 9. P. 10.
3. Василенко Г.И., Тараторин А.М., Соколов А.Л. // Радиотехника. 2023. Т. 87. № 3.
4. Решетников Д.Д., Соколов А.Л., Вашукевич Е.А., Петров В.М., Голубева Т.Ю. // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2024. Т. 67 (1). С. 58-72.
5. Соколов А.Л., Петров В.М., Венедиктов В.Ю., Решетников Д.Д. // Photonics Russia. 2023. V. 17 (7).

УДК 535(06)+004(06)

А.К. НАНИДЖАНЯН[1], В.В. ТОПОРОВСКИЙ[1,2], Л.Н. ИСАЕВА[1]
[1]*Московский технический университет связи и информатики*
[2]*Институт динамики геосфер им. М.А. Садовского РАН, Москва*

ВОЗМОЖНОСТЬ УВЕЛИЧЕНИЯ СКОРОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КВАНТОВОГО КЛЮЧА ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРУ ЗА СЧЁТ ПРИМЕНЕНИЯ АДАПТИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОРРЕКЦИИ ВОЛНОВОГО ФРОНТА

Приведены результаты экспериментов по исследованию влияния тепловых помех на характеристики квантового канала системы квантового распределения ключей. Изучены характеристики оптической связи в условиях спокойной и возмущённой атмосферы.

A.K. NANIDZHANYAN[1], V.V. TOPOROVSKY[1,2], L.N. ISAEVA[1]
[1]*Moscow Technical University of Communications and informatics*
[2]*Sadovski Dynamics Geosphere Institute of the RAS, Moscow*

POSSIBILITY OF INCREASING THE SPEED OF QUANTUM KEY DISTRIBUTION THROUGH THE ATMOSPHERE BY APPLYING ADAPTIVE OPTICAL SYSTEMS OF WAVEFRONT CORRECTION

The results of experiments on the investigation of the influence of thermal disturbances on the characteristics of the quantum channel of the quantum key distribution system are obtained. The characteristics of optical communication under conditions of a calm and disturbed atmosphere are investigated.

Реализация квантового распределения ключей (КРК) в атмосферных оптических линиях связи (АОЛС) предоставляет возможность решения проблемы защиты передачи информации в беспроводных системах связи. Однако при передаче кубитов в атмосфере различные атмосферные турбулентности могут увеличивать потери в квантовом канале. Для подавления влияний, вызванных турбулентностями, могут быть использованы методы адаптивной оптики [1].

Целью работы является физическое моделирование градиентов температуры на оптической трассе и исследование их влияния на характеристики квантового канала связи. На созданном стенде реализована двухпроходная схема Plug&Play квантового

криптографического протокола BB84 [2]. На стенде был реализован беспроводной квантовый канал, обеспечивающий соединение блоков КРК, аналогично [2, 3]. Подробное описание методик для создания оптических возмущений на трассе содержится в [4, 5]. Парафиновая свеча применялась для создания градиентов температуры на трассе и являлась источником вносимых в атмосферный канал турбулентностей [5].

Были получены зависимости динамики среднего коэффициента квантовых битовых ошибок (QBER) (рис. 1) и средней скорости генерации просеянного ключа (рис. 2) за сеанс связи для условий невозмущённой среды и при внесении источника возмущений на разных участках атмосферной трассы. Установлено, что при парафиновой свече, установленной ближе к коллиматору «Алиса» и по центру атмосферного канала, QBER наизначительнейшим образом возрастает, а скорость генерации квантового ключа падает. Созданная методика может применяться при разработке системы с использованием адаптивной оптики для увеличения эффективности передачи секретного ключа в атмосфере.

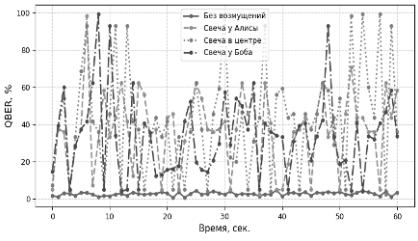


Рис. 1. Средний QBER за сеанс связи

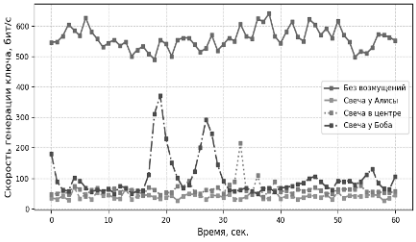


Рис. 2. Средняя скорость выработки просеянного ключа за сеанс связи

Список литературы

1. Toporovsky V., Galaktionov I., Kudryashov A., et al. // Proc. of ICCT. 2023. P. 1-5.

2. Ерохин К.Ю., Казанцев С.Ю., Казиева Т.В. и др. // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 11. С. 63-70.

3. Казанцев С.Ю., Ерохин К.Ю. и др. // Наука, техника, педагогика в высшей школе: Материалы Всероссийской научно-практической конференции. 2023. С. 205-211.

4. Наниджанян А.К., Жуковский Д.Д., Казанцев С.Ю. // Современная педагогика и научные исследования в образовательной организации высшего образования. Материалы Всероссийской научно-методической конференции. 2024. С. 32-38.

5. Pchelkina N.V., Zhukovsky D.D., Nanidzhanyan A.K., et al. // 2024 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. 2024. P. 1-7.

УДК 535(06)+004(06)

Л.А. МИЗЯК, А.С. ЛЕВЧЕНКО
Кубанский государственный университет, Краснодар

ПРОБЛЕМА ЛОКАЛИЗАЦИИ ОШИБОК В КАНАЛЕ СВЯЗИ ОПТИЧЕСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ

Рассмотрена актуальность разработки отечественного специализированного программного обеспечения по автоматизированному выявлению, анализу и локализации ошибок в оптической транспортной сети связи.

L.A. MIZYAK, A.C. LEVCHENKO
Kuban State University, Krasnodar

THE PROBLEM OF ERRORS LOCALIZATION IN THE COMMUNICATION CHANNEL OPTICAL TRANSPORT NETWORK

The article considers the relevance for the development the domestic specialized software for automated detection, analysis and localization errors in the optical transport communication network.

У каждого производителя телекоммуникационного оборудования операторского класса существуют свои программные системы централизованного управления компонентами, из которых формируется транспортная сеть связи. Зарубежные системы управления, используемые у российских операторов, позволяют осуществлять мониторинг исключительно за оборудованием одноимённого производителя. Что сильно усложняет поиск и локализацию проблем на длинных каналах связи, проходящих через множество разнотипного оборудования, закупленного у различных вендоров. Например, на магистральной транспортной сети компании Ростелеком используется более семи вендоров (Alcatel-Lucent, Huawei, NEC, Infinera, Coriant, ECI и T8), и компания настроена на сокращении их количества до пяти, например, заменой на оборудование отечественного производителя компании T8.

В результате, нередки ситуации с периодическим накоплением ошибок по каналам связи (к примеру, канал 100 Гбит/с Москва-Екатеринбург), когда в реальном режиме времени инженеру мониторинга невозможно отследить небольшое ухудшение работы каждого канала на сети, но для потребителя даже редкие кратковременные прерывания бывают критичны из-за перестроения трафика. Накопление малого количества ошибок не

ведёт к простою трафика с точки зрения оптического оборудования DWDM, именно поэтому на системе управления накопление ошибок не сопровождается появлением критических аварий и возможно лишь информативное предупреждение, если количество ошибок превысит заданное значение в единицу времени. Из-за этого проблема решается только после сообщения клиента об ухудшении предоставляемых услуг. В этом случае специалисту требуется определить неисправный канал, проанализировать трассу прохождения, сделать запрос оптических характеристик и статистику накопления ошибок на всех участках, только после этого, проанализировав огромное количество данных, инженер может сделать вывод о наличии проблемы. Этот процесс занимает продолжительный промежуток времени и может быть автоматизирован с помощью специально разработанного программного обеспечения, реализующего алгоритмы локализации участков накопления ошибок, методы выявления неисправных плат или оптических вставок в рамках транспортной сети, с предложением методов устранения нестабильности.

В соответствии с директивами правительства РФ [1] и вышеизложенным о проблеме поиска и локализации неисправностей на длинных каналах связи, идущих через совокупность оборудования различных вендоров, насущным является создание российского программного обеспечения автоматического поиска, локализации и анализа неисправностей в мультивендорных сетях провайдера. На данный момент именно инженеры, используя множество систем управления, фактически в ручном режиме анализируют, выявляют, локализуют и выдают рекомендации по устранению ошибок, но дефицит количества квалифицированных специалистов, в одиночку умеющих всё это делать, увеличивается. Указанное программное обеспечение должно собирать и обрабатывать статистические данные с оборудования различных вендоров, взаимодействовать с ними, в том числе систематизировать и автоматизировать работу и обработку этих данных. В результате, алгоритм должен показывать локализованную неисправность, а также для типичных ошибок должны быть изначально реализованы рекомендации по устранению. На наш взгляд наиболее важными и рекомендуемыми для включения в подобные системы являются: ES – секундный интервал с ошибками; UAS – секундный интервал недоступности; BBE – фоновая блочная ошибка; SES – секундный интервал с серьезными ошибками.

Список литературы

1. Директива "О переходе АО на преимущественное отечественное программное обеспечение" № 10068п-П13 // Собрание законодательства Российской Федерации. 2018.

УДК 535(06)+004(06)

К.Ш. АВТАНДИЛОВ
Московский технический университет связи и информатики

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЯЮЩИЕ СРЕДЫ ДЛЯ КВАНТОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ

Проведён анализ перспективных направляющих сред для повышения дальности и эффективности передачи одиночных фотонов в квантовых коммуникациях. Рассмотрены среды с низким затуханием, применимые в диапазоне длин волн, оптимальном для детекторов одиночных фотонов. Показано, что использование полых оптических волокон снижает потери и повышает эффективность квантовых каналов связи.

K.Sh. AVTANDILOV
Moscow Technical University of Communications and Informatics

PROSPECTIVE GUIDING MEDIA FOR QUANTUM COMMUNICATIONS

This study presents an analysis of prospective guiding media for extending the range and improving the efficiency of single-photon transmission in quantum communications. Low-attenuation media applicable in the wavelength range optimal for single-photon detectors were examined. It is shown that selecting an appropriate wavelength and employing hollow-core optical fibers can significantly reduce losses and enhance the efficiency of quantum communication channels.

В настоящее время усиленно развиваются технологии квантовых компьютеров, поэтому совершенствуются и методы квантовой криптографии [1], составляющие конкуренцию традиционным криптографическим методам,. Квантовое распределение ключей гарантирует защиту информации, где криптографический ключ формируется за счёт передачи информации одиночными фотонами [2]. Затухание сигнала в оптическом волокне и низкая эффективность детекторов одиночных фотонов ограничивают дальность квантовой связи, что требует задействования доверенных узлов [3].

В настоящее время разрабатываются детекторы одиночных фотонов, работающие в первом окне прозрачности [4]. Для квантовых коммуникаций целесообразно использование направляющих сред, действующих в этом диапазоне с наилучшими возможными характеристиками.

Исследование [3] представило полые световоды с рекордно низкими значениями затухания: 0,6 дБ/км на длине волны 850 нм. В связи с этим рассматривается вероятность детектирования одиночных фотонов с различными значениями оптических потерь на длине волны 850 нм с использованием многомодовых и полых световодов (рис. 1) [2].

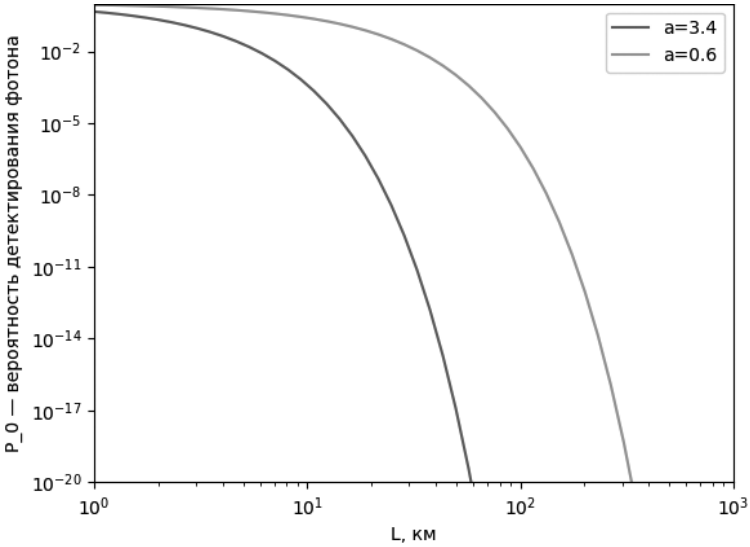


Рис. 1. График вероятностей детектирования одиночного фотона при использовании волокон с разными затуханиями на длине волны 850 нм: серый – многомодовое оптическое волокно с затуханием 3,4 дБ/км, светло-серый – полое оптическое волокно с затуханием 0,6 дБ/км [3]

Результаты исследований могут быть полезны для разработки эффективных направляющих сред для квантовых коммуникаций.

Список литературы

1. Панков К.Н., Миронов Ю.Б. Применение квантовых методов в задачах защиты информации. Москва: Научно-техническое издательство "Горячая линия-Телеком", 2022.

2. Сукачев Д.Д. Протяжённые квантовые сети // Успехи физических наук. 2021. Т. 191. № 10. С. 1077-1094.

3. Прямиков А.Д., Гладышев А.В., Косолапов А.Ф., Буфетов И.А. Полые световоды: современное состояние и перспективы развития // Успехи физических наук. 2024. Т. 194. № 2. С. 138.

4. Los J.W., Sidorova M., Lopez-Rodriguez B., Qualm P., Chang J., Steinhauer S., Zwiller V., Zadeh I.E. High-performance photon number resolving detectors for 850 - 950 nm wavelength range // APL Photonics. 2024. V. 9. No. 6.

УДК 535(06)+004(06)

С.Б. БЫЧКОВ, И.С. КОРОЛЁВ, С.В. ТИХОМИРОВ
Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва

ИССЛЕДОВАНИЯ ИСТОЧНИКА ОДИНОЧНЫХ ФОТОНОВ С ПОМОЩЬЮ ОДНОФОТОННОГО ФОТОДЕТЕКТОРА НА ОСНОВЕ MRS-ЛАВИННОГО ФОТОДИОДА

В работе рассматривается метод исследования статистических характеристик источников одиночных фотонов, работающих по принципу ослабления оптических импульсов лазера. Описана методология подходов, применяемых для получения и экспериментального подтверждения статистических характеристик источников, работающих на этом принципе и приведены результаты экспериментального исследования собранного источника.

S.B. BUCHKOV, I.S. KOROLEV, S.V. TIKHOMIROV
All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements, Moscow

STUDIES OF THE SOURCE OF SINGLE PHOTONS USING A SINGLE-PHOTON PHOTODETECTOR BASED ON THE MRS AVALANCHE PHOTODIODE

The report discusses a method for studying the statistical characteristics of single photon sources operating on the principle of attenuation of optical laser pulses, and describes the methodology of approaches used to obtain and experimentally confirm the statistical characteristics of sources operating on this principle and presents the results of an experimental study of the collected source.

Источники одиночных фотонов используются при решении задач квантовой криптографии и информатики. Наиболее простой, широко использующийся на практике подход к реализации однофотонного излучения – это ослабление последовательности лазерных оптических импульсов до уровня, когда средняя энергия одного оптического импульса становится меньше средней энергии единичного фотона, излучаемого лазером. Поскольку излучение лазера имеет высокую степень когерентности, количество фотонов в одном ослабленном оптическом импульсе обладает статистикой Пуассона, что, в общем случае, необходимо подтвердить. Вероятность излучения n фотонов в ослабленном импульсе $P(n)$ будет описываться формулой:

$$P(n) = \frac{e^{-\mu}}{n!} \cdot \mu^n, \quad (1)$$

где μ – отношение средней энергии импульса к средней энергии одного фотона. При значениях μ < 1, вероятность излучения единичного фотона *P(1)* становится больше вероятностей излучения двух и более фотонов *(P(n), n* > 1*)*. В проведённом исследовании статистики источника с длиной волны 850 нм и μ = 1,033, использовалось ФПУ типа ПР-ЛФД1 с волоконным входом разработки ВНИИОФИ (далее – ОФД), собранное на основе MRS-фотодиода СРТА-152. Это кремниевый фотодиод, имеющий 21 приёмную площадку, работящую в гейгеровском режиме. Площадки фотодиода включены параллельно, поэтому срабатывание двух площадок обеспечивает импульс тока двойной амплитуды, трёх-тройной и далее. Для анализа статистических характеристик оптического излучения источника использовалась математическая модель (2) [1].

$$Pд(3) = P(3)\cdot\eta^3;$$
$$Pд(2) = P(2)\cdot\eta^2 + P(3)\cdot\eta^2\cdot(1-\eta)\cdot C_3^2 + Pд(3);$$
$$Pд(1) = P(1)\cdot\eta + P(2)\cdot\eta\cdot(1-\eta)\cdot C_2^1 + P(3)\cdot\eta\cdot(1-\eta)^2\cdot C_3^1 + Pд(2);$$

где *Pд(1), Pд(2), Pд(3)* – вероятности детектирования импульсов единичной, двойной и тройной амплитуды соответственно. Накопление статистики срабатываний ОФД позволяет получить эти же вероятности экспериментально. Результаты показали соответствие экспериментальных значений и значений, полученных по формулам (2) на основании гипотезы пуассоновской статистики. Это позволяет сделать вывод о перспективности применения MRS-фотодетекторов для исследования подтверждения однофотонности источников одиночных фотонов на эффекте ослабления лазерных импульсов.

Список литературы

1. Бычков С.Б., Глазов А.И., Лушпа Я.А., Савкин К.Б., Светличный А.Б., Тихомиров С.В. Реализация однофотонного источника для калибровки приемников, работающих в режиме счета фотонов // Фотон-Экспресс. 2018. № 5. С. 4-13.

УДК 535(06)+004(06)

М.А. ЯРЫГИН, А.К. НАНИДЖАНЯН, Ж. РАБЕНАНДРАСАНА
Московский технический университет связи и информатики

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БЮДЖЕТ УСТАНОВКИ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ

Представлено описание установки и методик эксперимента, разработанных для исследований технологии квантового распределения ключей через направляющую среду, подвергающуюся внешним воздействиям. При различных значениях оптических потерь в направляющей среде получены зависимости скорости генерации просеянного ключа и QBER от времени в квантовом канале связи.

M.A. YARYGIN, A.K. NANIDZANYAN, J. RABENANDRASANA
Moscow Technical University of Communications and Informatics

ENERGY BUDGET OF A QUANTUM KEY DISTRIBUTION INSTALLATION

An experimental installation is created and a scientifically based method is developed for investigating quantum key distribution through a transmission medium subject to external influences. At different values of optical losses in the transmission medium, the dependences of the sifted key generation rate and QBER on time in a quantum channel are obtained.

Физическое моделирование воздействия ударов молний и атмосферного электричества на классические сигналы, распространяющие по оптическому волокну в ВОЛС, проводилось в работе [1] с помощью искусственных облаков заряженного водного аэрозоля, создаваемых установкой «ГРОЗА». В работах [2, 3] были рассмотрены некоторые лабораторные методики для анализа воздействия молний на инфраструктуру квантовых сетей, но в них не учитывалось возможное влияние изменения оптических потерь в направляющих средах. Поэтому актуальной задачей является учёт влияния оптический потерь на параметры квантового распределения ключей (КРК).

Целью настоящей работы являлась разработка лабораторного стенда и методик для систематического изучения характеристик квантового канала связи при контролируемом изменении оптических потерь в направляющих средах, по которым осуществляется КРК. Стенд состоял из следующих компонентов: блоки КРК «АЛИСА» и «БОБ» установки научно-

образовательного комплекса (НОК) EMQOS 1.0. [4], на которых реализована схема КРК по протоколу BB84, и квантовый канал, реализованный через одномодовый оптический кабель типа SMF-28.

Получены зависимости средней скорости выработки просеянного ключа (рис. 1) и среднего QBER (рис. 2) в зависимости от внесения дополнительных потерь в квантовый канал. Продемонстрировано, что средняя скорость генерации квантового ключа уменьшается, а средний QBER увеличивается с ростом затухания в направляющей среде, в которой реализован квантовый канал связи.

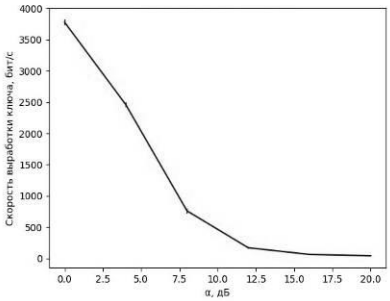


Рис. 1. Зависимость средней скорости генерации просеянного ключа от затухания

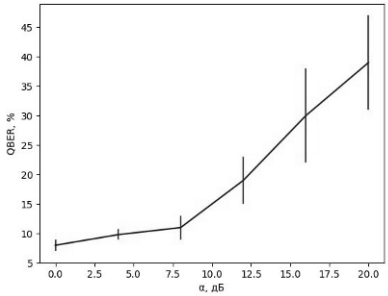


Рис. 2. Зависимость среднего QBER от затухания

Результаты исследований позволили выявить достаточно высокую воспроизводимость определения параметров квантового канала связи, выполняемых с помощью НОК EMQOS 1.0., а также определить точность, с которой можно фиксировать изменения средней скорости генерации квантового ключа и QBER в линиях связи с затуханием. Можно полагать, что если атмосферные разряды будут оказывать влияние на затухание в линии связи, то по резкому изменению параметра QBER этот разряд может быть зарегистрирован, аналогично [5].

Список литературы

1. Белова О.С. и др. // Электротехника. 2023. № 8. С. 49-53.

2. Rabenandrasana J., et al. // 2024 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). 2024. P. 1-7.

3. Болотов Д.В. и др. // Новые технологии. Наука, техника, педагогика: Московский Политех. 2024. С. 117-123.

4. Рабенандрасана Ж. и др. // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов (REDS). 2023. Т. 14. № 3. С. 41-47.

5. Белова О.С. и др. // Электричество. 2024. № 2. С. 4-10.

УДК 535(06)+004(06)

С.Б. БЫЧКОВ, И.С. КОРОЛЁВ, С.В. ТИХОМИРОВ
Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва

ИССЛЕДОВАНИЯ КВАНТОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОДНОФОТОННЫХ ФОТОДЕТЕКТОРОВ С УЧЁТОМ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ТЕМНОВОГО СЧЁТА И ПОСЛЕИМПУЛЬСОВ

В работе описаны результаты исследования квантовой эффективности и вероятностей ложных срабатываний стробируемых однофотонных фотодетекторов с волоконным входом, полученные на разработанной в ФГБУ «ВНИИОФИ» установке, позволяющей реализовать методы измерения параметров однофотонных источников и приёмников методами, гармонизированными с рекомендациями Европейского института телекоммуникационных стандартов.

S.B. BUCHKOV, I.S. KOROLEV, S.V. TIKHOMIROV
All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements, Moscow

STUDIES OF THE QUANTUM EFFICIENCY OF SINGLE-PHOTON PHOTODETECTORS TAKING INTO ACCOUNT THE PROBABILITIES OF DARK COUNTING AND AFTERPULSES

The report describes the results of a study of the quantum efficiency and probabilities of false positives of gated single-photon photodetectors with fiber input, obtained at an installation developed at VNIIOFI, which allows implementing methods for measuring the parameters of single-photon sources and receivers using methods harmonized with the recommendations of the European Telecommunications Standards Institute.

Квантовое распределение ключа (КРК) используется в криптографических системах ассиметричного шифрования с одноразовым колючем (квантово-криптографических системах). Они обеспечивают регулярное безопасное обновление ключа шифрования, при этом доказательство секретности ключа базируется на принципе неопределенности Гейзенберга. Важной частью современных систем КРК являются однофотонные фотодетекторы (ОФД). Основной характеристикой ОФД является его квантовая эффективность. Кроме того,

для ОФД характерны ложные срабатывания – темновые отсчёты и послеимпульсы. Знание вероятностей ложных срабатываний ОФД является необходимым при проектировании систем КРК, так как от них в значительной степени зависят максимальное расстояние передачи и скорость выработки секретного ключа. В ФГБУ «ВНИИОФИ» была разработана методика и собрана установка, предназначенная для определения характеристик ОФД с волоконно-оптическим входом, позволяющая измерять характеристики ОФД в соответствии с ETSI GS QKD 011 V1.1.1 [1]. Применяемые методы позволяют вычислить вероятностей $p_{верн}$ верных срабатываний ОФД и вероятности ложных срабатываний разных типов на основании различных статистических моделей [2]. Вычисление квантовой эффективности η ОФД производится на основании вероятности $p_{верн}$ при подаче на вход приёмника излучения от источника псевдооднофотонных импульсных последовательностей, средняя энергия оптического импульса в котором составляет μ (< 1) энергии единичного фотона

$$\eta = \frac{-\ln(1-p_{верн})}{\mu}\cdot 100\ [\%].$$

Методы и методики были апробированы при исследовании характеристик однофотонного фотодетектора LynXea (Aurea, Франция) на основе InGaAs-лавинного фотодиода, работающего в режиме гейгеровского пробоя, снятые на длине волны 1550 нм, на частоте строб-сигналов равной 2.5 МГц. Квантовая эффективность составила η = 15.3 %, вероятность послеимпульса в первом стробе после срабатывания $p_{after}(2) = 0.2$, вероятность темнового импульса в единичном стробе $p_{dark} = 6.4\cdot10^{-5}$. Основным результатом данной работы является реализация первоочередных основ аппаратной и методической базы для обеспечения реализации перспективных квантовых волоконно-оптических системах передачи информации, в части измерений квантовой эффективности широкой номенклатуры однофотонных фотодетекторов с учётом вероятности ложных срабатываний, с использованием методов, гармонизованных с международными рекомендациями ETSI QKD GS 011.

Список литературы

1. ETSI GS QKD 011 ETSI GS QKD 011 V1.1.1 (2016-05) Quantum Key Distribution (QKD). Component characterization: characterizing optical components for QKD systems.

2. Бычков С.Б., Королёв И.С., Тихомиров С.В., Борисова А.В. Измерения квантовой эффективности однофотонных фотодетекторов с учётом вероятностей темнового счёта и послеимпульсов для задач метрологического обеспечения квантово-криптографических систем // Фотон-экспресс. 2022. № 4 (180). С. 11.

УДК 535(06)+004(06)

В.В. ТОПОРОВСКИЙ[1,2], И.В. ГАЛАКТИОНОВ[1,2]
[1]*Московский технический университет связи и информатики*
[2]*Институт динамики геосфер им. М.А. Садовского РАН, Москва*

ДВУХКОНТУРНАЯ АДАПТИВНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КОРРЕКЦИИ АБЕРРАЦИЙ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЫ

В работе представлены результаты по созданию двухконтурной адаптивной оптической системы замкнутого цикла с последовательной коррекцией низкочастотного и высокочастотного спектра аберраций волнового фронта лазерного излучения в условиях турбулентной атмосферы при помощи корректора наклонов, биморфного и пьезоактюаторного деформируемых зеркал.

V.V. TOPOROVSKIY[1,2], I.V. GALAKTIONOV[1,2]
[1]*Moscow Technical University of Communications and informatics*
[2]*Sadovski Dynamics Geosphere Institute of the RAS, Moscow*

DUAL-LOOP ADAPTIVE OPTICAL SYSTEM FOR CORRECTION OF WAVEFRONT ABERRATIONS OF LASER RADIATION IN TURBULENT CONDITIONS

The paper presents the results of creating a closed-loop dual-loop adaptive optical system with sequential correction of the low-frequency and high-frequency spectrum of aberrations of the wavefront of laser radiation in a turbulent atmosphere using a fast-steering mirror, bimorph and piezo-actuator deformable mirrors.

Создание корректора волнового фронта с совершенными пространственно-частотными характеристиками, способного одновременно компенсировать медленноменяющиеся крупномасштабные аберрации волнового фронта, имеющие большую амплитуду (> 20 мкм), и мелкомасштабные фазовые искажения, обладающие малой амплитудой (< 0,5 мкм), но изменяющиеся с большой частотой (более 200 Гц), сопряжено со значительными техническими затруднениями. Именно поэтому используются адаптивные оптические системы с несколькими корректорами волнового фронта, которые позволяют эффективно использовать преимущества каждого из деформируемых зеркал [1].

Принципиальная оптическая схема двухконтурной адаптивной оптической системы представлена на рис. 1. В программной среде Zemax

была произведена оптимизация с целью минимизации начальных аберраций волнового фронта оптических элементов системы. Она состояла из корректора наклонов [2], двух корректоров волнового фронта (биморфного [3] и пьезоактюаторного [4]), согласующей оптики для увеличения размера пучка с 50 до 75 мм. Для оценки эффективности работы системы была использована длиннофокусная линза, в фокусе которой располагалась камера дальнего поля. Обратная связь для управления актюаторами деформируемых зеркал обеспечивалась двумя независимыми датчиками волнового фронта Шака–Гартмана.

Динамика коррекции аберраций волнового фронта в зависимости от режима работы адаптивной системы представлена на рис. 2.

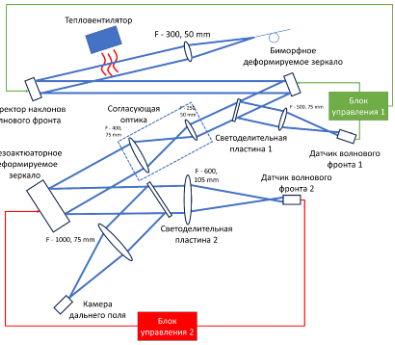


Рис. 1. Принципиальная схема двухконтурной адаптивной оптической системы



Рис. 2. Динамика изменения величины искажений в двухконтурной адаптивной оптической системе

В результате коррекции было показано, что применение корректора наклонов обеспечило стабилизацию пучка на сенсоре камеры в дальнем поле, дополнительное применение биморфного зеркала увеличило величину фактора Штреля до 0,67, конфигурация с тремя корректорами (с добавлением пьезоактюаторного деформируемого зеркала) позволила добиться улучшения качества фокусировки на 34 % в сравнении с первоначальным (до 0,91 по оценочной величине фактора Штреля).

Список литературы

1. Toporovsky V., Galaktionov I., Nikitin A., et al. // Proc. SPIE. 2024. V. 13130. P. 131300I.

2. Топоровский В.В. // Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Москва, 2024. С. 289-292.

3. Топоровский В., Галактионов И., Абдулразак С., Кудряшов А. // Оптический журнал. 2025. Т. 92. С. 16-25.

4. Toporovsky V., Galaktionov I., Kudryashov A., et al. // Proc. of ICCT. 2023. P. 1-5.

УДК 535(06)+004(06)

С.Б. БЫЧКОВ, А.О. ПОГОНЫШЕВ, С.В. ТИХОМИРОВ
Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва

ОПТИЧЕСКАЯ РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ В РЕЖИМЕ СЧЁТА ФОТОНОВ

Приводится сравнение характеристик динамического диапазона и пространственного разрешения OTDR, которые возможно получить с использованием в этих приборах при помощи линейных фотодетекторов и фотодетекторов, работающих в режиме счёта фотонов.

S.B. BUCHKOV, A.O. POGONYSHEV, S.V. TIKHOMIROV
All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements, Moscow

TIME DOMAIN OPTICAL REFLECTOMETRY IN THE PHOTON COUNTING MODE

A comparison is made of the characteristics of the dynamic range of OTDR, which can be obtained using linear photodetectors and photodetectors operating in the photon counting mode in these devices.

Оптическая рефлектометрия во временной области (optic time-domain reflectometry, OTDR) находит широкое применение при проектировании, прокладке и эксплуатации волоконно-оптических линий связи, систем волоконно-оптических датчиков и прочих систем, использующих оптическое волокно для передачи информации. Основными характеристиками OTDR являются динамический диапазон и пространственное разрешение. OTDR используют быстродействующие фотоприёмные устройства для измерения сигнала обратного рассеяния, возникающего при прохождении оптического зондирующего импульса вдоль волоконно-оптической трассы. При этом, основной технической характеристикой данных приборов является динамический диапазон, который определяется, как полуразность между мощностью, рассеянной в начале волокна Рс [дБм] и эквивалентной мощностью шума Рш [дБм] [1], определяется, в основном, спектральной плотностью шума фотодетектора, которая, в случае использования pin-фотодиода в линейном режиме может быть вычислена по формуле:

$$NEP_{pd} = \Delta I/(S\,G),$$

где ΔI – спектральная плотность шумового тока фотодиода [А/Гц$^{1/2}$], S – его спектральная чувствительность на рабочей длине волны, [А/Вт], G – коэффициент лавинного умножения (обычно не от 1 до 100). Типовым значением NEP быстродействующих фотодиодов составляют порядка 10^{-15} - 10^{-13} Вт/Гц$^{1/2}$.

Современные детекторы одиночных фотонов на основе InGaAs-фотодиодов, работающих в режиме гейгеровского пробоя, обладают близкими к предельно-возможным характеристиками чувствительности и отличными динамическими характеристиками. Спектральная плотность мощности шума такого детектора может быть вычислена по формуле

$$NEP_{sp\text{-}apd} = (h\nu/\eta)\cdot(2p_{dc})^{1/2},$$

где p_{dc} – вероятность ложного срабатывания в единичном стробе фотодетектора [1/Гц], η – квантовая эффективность ОФД на рабочей длине волны, $h\nu$ – энергия одного фотона, [Дж]. Для ОФД на основе InGaAs лавинного фотодиода в гейгеровском режиме данное значение может достигать 10^{-16} Вт/Гц$^{1/2}$ и менее, что позволяет расширить динамический диапазон и пространственное разрешение OTDR [2].

На рис. 1 представлена структурная схема однофотонного OTDR-измерителя: АТТ – оптический перестраиваемый аттенюатор, СП – волоконно-оптический сплиттер, ИЛИ – импульсный лазерный излучатель, ОФД – однофотонный фотодетектор.

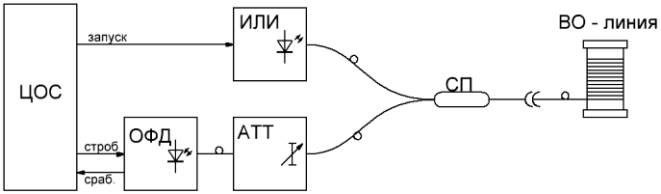


Рис. 1. Структурная схема однофотонного OTDR-измерителя

Список литературы

1. Листвин А.В., Листвин В.Н. Рефлектометрия оптических волокон. М: ЛЕСАРТ, 2005.

2. Бычков С.Б., Погонышев А.О., Тихомиров С.В. Оптическая рефлектометрия во временной области в режиме счёта фотонов – преимущества и недостатки. // Фотон-экспресс. 2024. № 5. С. 197.

И.В. ГАЛАКТИОНОВ[1,2], В.В. ТОПОРОВСКИЙ[1,2]
[1]*Московский технический университет связи и информатики*
[2]*Институт динамики геосфер им. М.А. Садовского РАН, Москва*

ШИРОКОАПЕРТУРНЫЙ МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ДАТЧИК ВОЛНОВОГО ФРОНТА ШАКА–ГАРТМАНА

Разработан многоканальный широкоапертурный датчик Шака–Гартмана с высоким разрешением для мультиспектрального зондирования волнового фронта.

I.V. GALAKTIONOV[1,2], V.V. TOPOROVSKY[1,2]
[1]*Moscow Technical University of Communications and Informatics*
[2]*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of the RAS, Moscow*

WIDE APERTURE MULTICHANNEL SHACK–HARTMANN WAVEFRONT SENSOR

Multi-channel wide-aperture high-resolution Shack–Hartmann sensor for multispectral wavefront sensing is developed.

Датчик волнового фронта Шака–Гартмана – широко известное устройство, которое используется в разнообразных приложениях – для измерения искажений волнового фронта излучения, прошедшего через различные среды – турбулентную и/или рассеивающую атмосферу [1 - 4], биологические ткани [5, 6] и другие среды, для контроля качества мощного лазерного луча при резке, сварке или других операциях [7, 8].

В некоторых случаях необходимо иметь несколько датчиков волнового фронта Шака–Гартмана [9] в пределах одной экспериментальной установки, то есть когда необходима однократная пространственно-временная характеристика лазерного импульса. Для измерения пространственно-спектрального электрического поля лазерный импульс можно спектрально модулировать, разделить и измерить датчиком волнового фронта. Чтобы упростить экспериментальную установку и аппаратное управление, можно использовать одиночный датчик волнового фронта. Для этого следует использовать широкоапертурную цифровую камеру, а также широкоапертурную матрицу линз. И, конечно, необходимо разработать специальное программное обеспечение (рис. 1).

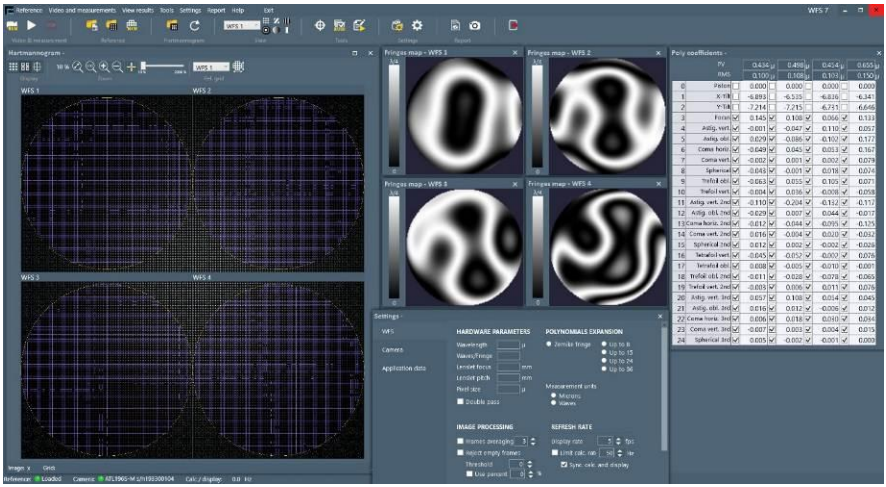


Рис. 1. Графический интерфейс приложения для измерения волнового фронта с помощью широкоапертурного многоканального датчика Шака–Гартмана

Было разработано автономное приложение для рабочего стола Windows, написанное на .NET C#, с графическим интерфейсом, построенным на WPF (Windows Presentation Foundation). Приложение реализует шаблон проектирования MVC/MVVM, который позволяет отделить бизнес-логику, уровень данных и пользовательский интерфейс друг от друга.

Список литературы

1. Galaktionov I., Kudryashov A., Sheldakova J., et al. // Proc. SPIE. 2019. V. 10886. P. 1088619.
2. Kudryashov A., Rukosuev A., Samarkin V., et al. // Proc. SPIE. 2018. V. 10772. P. 107720V.
3. Грин Х., Лейн В. // Москва, 1972. С. 500.
4. Зеге Э.П. // Минск: Наука и техника, 1985.
5. Сивухин Д.В. Общий курс физики. 2005. С. 582-583.
6. Mosk A. // Nature Photonics. 2012. V. 6. P. 283.
7. Nikitin A., Galaktionov I., Sheldakova J., et al. // Proc. SPIE. 2019. V. 10925. P. 109250K.
8. Galaktionov I., Nikitin A., Sheldakova J., et al. // Photonics. 2022. V. 9 (5). P. 296.
9. Galaktionov I., et al. // Algorithms. 2023. V. 16. P. 337.

УДК 535(06)+004(06)

О.А. СОЛОМАТИН[1], Б.А. НАСЕДКИН[1], А.О. ИСМАГИЛОВ[1], А.А. КАЛИНИЧЕВ[3], А.А. ГАЙДАШ[1,2], А.Н. ЦЫПКИН[1], А.В. КОЗУБОВ[1,2]

[1]Университет ИТМО, Санкт-Петербург
[2]Математический институт им. В.А. Стеклова РАН, Москва
[3]Санкт-Петербургский государственный университет

ВЛИЯНИЕ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР НА СТОЙКОСТЬ СИСТЕМ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ К АТАКЕ «ТРОЯНСКИЙ КОНЬ»

Приведены результаты исследования влияния отрицательных температур на возможность реализации атаки «Троянский конь» на системы квантового распределения ключей. Определены зависимости изоляционных свойств от температуры.

O.A. SOLOMATIN[1], B.A. NASEDKIN[1], A.O. ISMAGILOV[1], A.A. KALINICHEV[3], A.A. GAIDASH[1,2], A.N. TCYPKIN[1], A.V. KOZUBOV[1,2]

[1]ITMO University, Saint-Petersburg
[2]Steklov Mathematical Institute of the RAS, Moscow
[3]Saint-Peterburg State University

THE EFFECT OF NEGATIVE TEMPERATURES ON THE STABILITY OF QUANTUM KEY DISTRIBUTION SYSTEMS FOR THE «TROJAN HORSE» ATTACK

Presents the result of experiments on the effect of negative temperatures on the possibility of «Trojan horse» attack on quantum key distribution systems. Were determined the dependences isolation properties on temperature.

Одной из атак на системы квантового распределения ключей является «Троянский конь». При её реализации происходит зондирование модулятора, который выполняет кодирование информации, и анализ отражённого от мест соединения оптических элементов излучения [1]. Для защиты от такого воздействия в оптическую схему системы устанавливаются пассивные оптические компоненты, которые ослабляют зондирующие импульсы до заранее заданного уровня. Для определения требуемой величины ослабления зондирующих импульсов проводится исследование спектральных характеристик используемых компонентов.

Однако такие исследования обычно проводятся для фиксированных температур [2]. Отсутствие учёта изменений изоляции вследствие изменения температуры окружающей среды при оценке возможности реализации атаки «Троянский конь» может привести к появлению неучтённых побочных каналов, при помощи которых нарушитель может извлекать информацию о формируемых последовательностях.

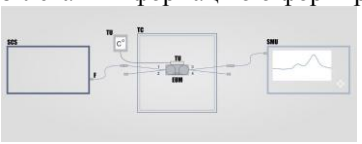


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Для исследования зависимости изоляционных свойств от температуры была собрана экспериментальная схема, изображённая на рис. 1. Установка состоит из генератора суперконтинуума со спектральным диапазоном излучения 1000 - 2000 нм, климатической камеры, позволяющей изменять температуру от -20 до +5 °C, спектроанализатора. Полученные спектры пропускания при прямом и обратном распространении излучения через изолятор для различных температур представлены на рис. 2.

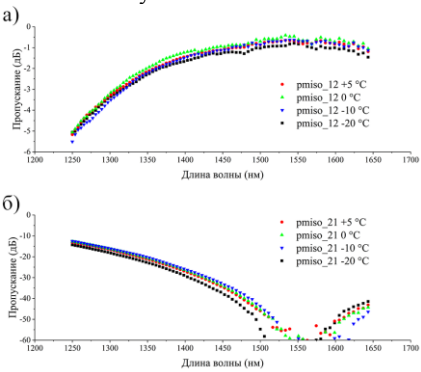


Рис. 2. Спектры пропускания при прямом (а) и обратном (б) распространении излучения для изолятора без сохранения поляризации в диапазоне 1250 - 1650 нм

При прямом подключении пропускание исследуемого изолятора в диапазоне температур от -20 до +5 °C не претерпевает значительных изменений. В то же самое время, для случая обратного распространения зондирующего излучения можно наблюдать, что при охлаждении до -10 °C минимум пропускания сдвигается в сторону больших длин волн, а пропускание увеличивается в диапазоне меньших длин волн. При этом дальнейшее охлаждение изолятора привело уже к смещению минимума пропускания в противоположную сторону и пропускание увеличилось в длинноволновой области рассмотренного диапазона. Таким образом можно сделать предположение об изменении знака постоянной Верде магнитооптического материала, используемого в исследуемом изоляторе.

Список литературы

1. Jain N., Stiller B., Khan I., et al. // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2014. V. 21. No. 3. P. 168-177.

2. Sushchev I.S., Bulavkin D.S., et al. // Physical Review Applied. 2024. V. 22. No. 3. P. 034032.

УДК 535(06)+004(06)

С.Ю. КАЗАНЦЕВ, К.Р. РОМАНОВ[1], М.А. ЯРЫГИН
Московский технический университет связи и информатики
[1]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ПОСТОБРАБОТКА ПРОСЕЯННЫХ КЛЮЧЕЙ В СИСТЕМАХ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧА ПРИ ПОМОЩИ АЛГОРИТМА «КАСКАД»

Разработан программный комплекс, реализующий алгоритм «Каскад» для коррекции ошибок в криптографических ключах, полученных при работе системы квантового распределения ключей на базе научно-образовательного комплекса EMQOS 1.0. Представлены результаты тестирования программного комплекса и проанализирована возможность его дальнейшей оптимизации с использованием машинного обучения.

S.Yu. KAZANTSEV, K.R. ROMANOV[1], M.A. YARYGIN
Moscow Technical University of Communications and Informatics
[1]National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

POST-PROCESSING OF SIFTED KEYS IN QUANTUM KEY DISTRIBUTION SYSTEMS USING THE “CASCADE” ALGORITHM

A software package has been developed that implements the «Cascade» algorithm for correcting errors in cryptographic keys obtained during the operation of the quantum key distribution system based on the scientific and educational complex EMQOS 1.0. The results of testing the software package are presented and the possibility of its further optimization using machine learning is analyzed.

При реализации технологии квантового распределения ключей (КРК) в просеянных квантовых ключах неизбежно содержатся ошибки [1]. После получения просеянного квантового ключа необходимо пройти этап постобработки – исправление ошибок в криптографическом ключе через протокол, позволяющий сделать это по открытому каналу связи без раскрытия самого криптографического ключа [1, 2].

Целью работы является практическая реализация алгоритма «Каскад», позволяющего исправлять ошибки в ключах классическим методом и проверка работы этого алгоритма при реализации КРК по протоколу BB84 на научно-образовательном комплексе (НОК) EMQOS 1.0. [3].

Алгоритм «Каскад» исправляет ошибки путём разделения ключа Боба на блоки и проверки чётности суммы битов в каждом блоке, подробное описание алгоритма и особенностей его реализации для систем КРК содержится в [2]. Процесс разделения ключа на блоки осуществляется итеративно, при этом в каждой итерации ключ случайно перемешивается, что позволяет найти все битовые ошибки. Частоту битовых ошибок в просеянном ключе характеризуют параметром QBER. Для минимизации возможной утечки информации о ключе, длина начальных блоков на каждой итерации рассчитывается по формуле $K_i = (0.73/QBER)*2^{i-1}$, где i – номер итерации. На основе [2] была разработан собственный алгоритм.

Для проверки алгоритма в программное обеспечение НОК EMQOS 1.0., написанное в среде разработки LabView, было встроено сохранение данных о параметрах квантового канала связи (рис. 1). Тестирование программного комплекса подтвердило работоспособность разработанных алгоритмов. Следует заметить, что кроме проверки алгоритма «Каскад», программный комплекс можно использовать для анализа внешних факторов, влияющих на параметры квантового канала связи [4].

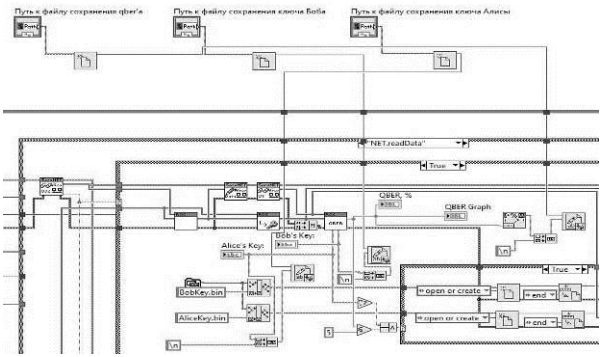


Рис. 1. Сохранение данных о QBER и ключах в среде разработки LabView

Список литературы

1. Панков К.Н., Миронов Ю.Б. Применение квантовых методов в задачах защиты информации. М.: Научно-техническое издательство "Горячая линия-Телеком", 2022.

2. Müller R., et al. Performance of Cascade and LDPC-codes for Information Reconciliation on Industrial Quantum Key Distribution Systems // arXiv preprint arXiv:2408.15758. 2024.

3. Рабенандрасана Ж. и др. // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов (REDS). 2023. Т. 14. № 3. С. 41-47.

4. Ерохин К.Ю., Казанцев С.Ю., Казиева Т.В. и др. // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 11. С. 63-70.

УДК 535(06)+004(06)

Н.В. НИКИТИН[1,2], Д.Р. ХАРАСОВ[1], Д.М. БЕНГАЛЬСКИЙ[1], В.Н. ТРЕЩИКОВ[1]
[1]*Группа компаний «Т8», Москва*
[2]*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

ВЛИЯНИЕ МЕТОДОВ ФИЛЬТРАЦИИ НА СКОРОСТЬ ОТКЛИКА ОПТОВОЛОКОННЫХ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДАТЧИКОВ

В этой работе мы сравниваем время отклика волоконно-оптического распределённого датчика температуры на комбинационном рассеянии с и без использования распределённого датчика изменения температуры на основе рэлеевского рассеяния на разных расстояниях от ближнего конца волокна с различными алгоритмами цифровой обработки.

N.V. NIKITIN, D.R. KHARASOV, D.M. BENGALSKII, V.N. TRESHCHIKOV
[1]*Company group «T8», Moscow*
[2]*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*

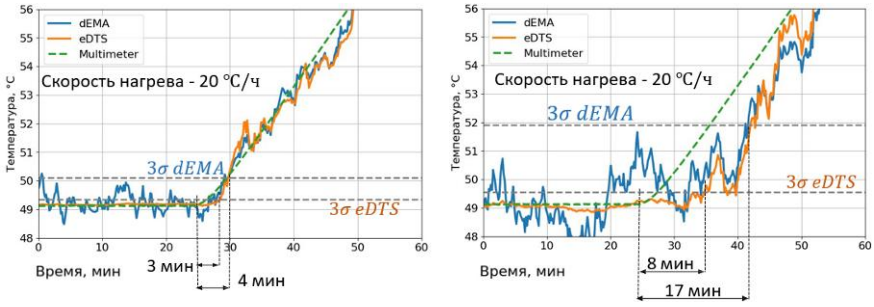
IMPACT OF FILTERING METHODS ON RESPONSE TIME OF DISTRIBUTED TEMPERATURE SENSORS

In this work, we compare response time of fiber-optic Raman distributed temperature sensor with different digital filters, with and without corrections from Rayleigh distributed temperature gradient sensor at different distances from the fiber near end.

Распределённые температурные датчики (DTS) получают широкое распространение в областях геофизического мониторинга и пожарной безопасности. Для измерения абсолютного значения температуры используются DTS на основе комбинационного рассеяния (R-DTS), а для точного измерения приращений температуры – на основе рэлеевского рассеяния (DTGS) [2]. DTGS может проводить только относительное измерение значения температуры и может зарегистрировать малые изменения температуры порядка 0.01ºC/сек. Использование комбинации показаний с обоих приборов (eDTS) с последующей обработкой фильтром Калмана позволяет увеличить точность измерения абсолютного значения температуры [3]. В работе проведено экспериментальное сравнение

времени отклика eDTS и R-DTS с применением двойного экспоненциального сглаживания (dEMA).

Катушки с оптическим волокном были помещены в термокамеру. Сначала волокно удерживалось при температуре 49 ºС, затем нагревались со скоростью 20ºС/ч. Опорный температурный датчик PT1000 был подключён к 6½-разрядному мультиметру Keithley DMM6500. На рис. 1*а* представлены результаты для расстояния в 10 км от ближнего конца, на рис. 1*б* представлены результаты для расстояния в 20 км.



а *б*

Рис. 1. Эксперимент для расстояния от ближнего конца в 10 км (*а*), в 20 км (*б*)

Быстродействие системы определяется временем пересечения уровня 3σ, где σ – среднеквадратическое отклонение на стационарном участке. Такая оценка необходима, так как она учитывает чувствительность прибора. На линиях до 10 км использование фильтра Калмана позволяет улучшить скорость отклика на 25 %, на линиях до 20 км – на 50 %. С увеличением длины линии происходит уменьшение порога вынужденного комбинационного рассеяния, следовательно для R-DTS возникает ограничение в мощности импульса., DTGS не имеет такого ограничения, а следовательно отношение сигнал/шум уменьшается медленнее с увеличением расстояния. Поэтому метод eDTS для длинных линий позволяет получить более высокую точность в сравнении со стандартными методами фильтрации.

Список литературы

1. Ukil A., Braendle H., Krippner P. // IEEE Sensors Journal. 2011. V. 12. No. 5. P. 885-892.
2. Nikitin S.P., et al. // Laser Physics. 2018. V. 28. No. 8. P. 085107.
3. Lauber T., Lees G. // IEEE Sensors Journal. 2020. V. 21. No. 6. P. 7948-7953.

УДК 535(06)+004(06)

В.В. ТОПОРОВСКИЙ[1,2], И.В. ГАЛАКТИОНОВ[1,2],
П.М. КУЗЬМИЦКИЙ[1]
[1]*Московский технический университет связи и информатики*
[2]*Институт динамики геосфер им. М.А. Садовского РАН, Москва*

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ УПРАВЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ БИМОРФНОГО КОРРЕКТОРА ВОЛНОВОГО ФРОНТА

В работе представлены теоретические расчёты по выявлению оптимальной геометрии управляющих элементов в биморфных корректорах волнового фронта лазерного излучения, исходя из локальной амплитуды деформации отражающей поверхности и точности воспроизведения ортогональных полиномов Цернике. Проанализированы характеристики деформируемых зеркал с радиально-кольцевым расположением электродов для 19, 37, 61, 91 и 127-элементного зеркала.

V.V. TOPOROVSKIY[1,2], I.V. GALAKTIONOV[1,2],
P.M. KUZMITSKIY[1]
[1]*Moscow Technical University of Communications and informatics*
[2]*Sadovski Dynamics Geosphere Institute of the RAS, Moscow*

OPTIMIZATION OF GEOMETRY LAYOUT IN BIMORPH WAVEFRONT CORRECTOR

The paper presents theoretical calculations to identify the optimal layout of control elements in bimorph wavefront correctors, based on the local stroke and the accuracy of reproducing orthogonal Zernike polynomials. The characteristics of deformable mirrors with a keystone geometry of electrodes for 19, 37, 61, 91 and 127-element mirrors are analyzed.

С точки зрения оценки величины воздействия атмосферной турбулентности в оптическом тракте на качество передаваемого лазерного излучения может быть использовано разложение фазового распределения внутри апертуры на ряд ортонормированных базисных функций [1]. Для описания фазовой поверхности, флуктуирующей во времени случайным образом, используются детерминированные базисные функции.

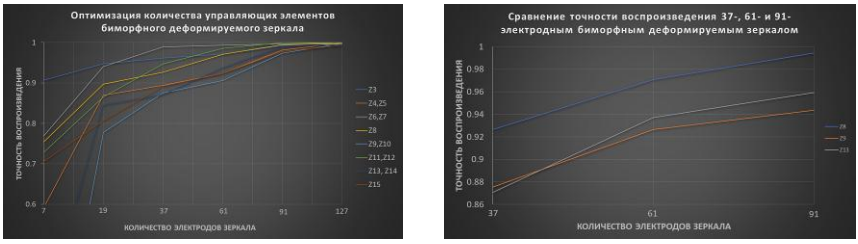
Существуют некоторые функции, которые используются для разложения фазы: при помощи степенных рядов, при помощи полиномов Цернике [2] и Карунена–Лоэва [3]. Представление аберраций с помощью

степенных рядов неэффективно, так как они не удовлетворяют условию ортонормированности. Разложение по полиномам Цернике особенно удобно с позиции простоты в аналитическом представлении, чем разложение по полиномам Карунена–Лоэва. Более того, полиномы Цернике обладают низкой погрешностью при вычислении и обработке результатов измерений, а также математического моделирования аберраций оптических систем.

Были проанализированы возможности воспроизведения полиномов Цернике, соответствующие низким порядкам (дефокусировка, астигматизмы, комы и сферическая аберрация). В качестве геометрии управляющих элементов были выбраны сетки с 19, 37, 61, 91 и 127 электродами, расположенными по радиально-кольцевой структуре таким образом, чтобы площади всех электродов были равны.

В качестве критерия оптимизации был выбрано значение остаточного СКО, которое соответствует поточечному вычитанию фазовых поверхностей с дискретным разбиением 1024 х 1024 точек. Значение фазы известно в каждой точке. Вычитая соответствующие значения фаз у двух поверхностей, получаем третью поверхность – разностную.

На рис. 1 представлена точность воспроизведения полиномов по отношению остаточного СКО для различного количества управляющих элементов для аберраций волнового фронта низких порядков (Z3-Z15).



а *б*

Рис. 1. Точность воспроизведения полиномов Цернике по величине остаточного СКО: полиномы Z3-Z15 для сетки с 19, 37, 61, 91 и 127 электродами (*а*), воспроизведение полиномов Цернике Z8, Z9, Z13 для конфигурации биморфного деформируемого зеркала с 37, 61 и 91 электродом (*б*)

Список литературы

1. Toporovsky V., Samarkin V., Kudryashov A., Galaktionov I. // Proc. SPIE. 2022. V. 12218. P. 1221806.

2. Rukosuev A., Nikitin A., Belousov V., et al. // Applied Sciences. 2021. V. 11 (24). P. 12112.

3. Dai G.M. // Journal of the Optical Society of America A. 1996. V. 13. P. 1218-1225.

УДК 535(06)+004(06)

М.Х. ЭГАМОВ, Б.И. МАХСУДОВ[1], У.Дж. РАХИМОВА
Худжандский научный центр Национальной академии наук Таджикистана
[1]Таджикский национальный университет, Душанбе, Республика Таджикистан

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПДЖК ПЛЁНОК РАЗНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ

Композиты ПДЖК на основе полимерной матрицы (ПМ) и жидкого кристалла (ЖК) 5CB были получены методами SIPS и TIPS. Установили, что капли ЖК имеют радиальную конфигурацию с гомеотропным расположением молекул, стабилизированную за счёт дипольных взаимодействий на границе раздела фаз. Они имеют субмикронный размер, меньший при низком содержании ЖК (около 250 нм) и больший при среднем (около 650 нм). Высокая поверхностная энергия позволяет рекомендовать их для использования в качестве оптических сенсоров.

M.Kh. EGAMOV, B.I. MAKHSUDOV[1], U.J. RAKHIMOVA
Khujand Scientific Center of the National Academy of Sciences of Tajikistan
[1]Tajik National University, Dushanbe, Republic of Tajikistan

SPECTROSCOPIC STUDIES OF THE ELECTRO-OPTICAL PARAMETERS OF PDCL FILMS OF DIFFERENT CONCENTRATIONS

PDLC composites based on a polymer matrix and liquid crystal (LC) 5CB were obtained using SIPS and TIPS methods. It was found that LC droplets have a radial configuration with a homeotropic arrangement of molecules, stabilized due to dipole interactions at the phase interface. They have a submicron size, smaller at low LC content (about 250 nm) and larger at medium (about 650 nm). The high surface energy makes it possible to recommend them for use as optical sensors.

Полимерно-дисперсные жидкокристаллические системы (ПДЖК) представляют собой интересный, высокоразвитый класс композиционных материалов благодаря своим особым электрооптическим свойствам, которые вызывают интерес к их фундаментальным и прикладным исследованиям. Они образуются жидкокристаллическими доменами микронного размера, диспергированными внутри матрицы, обычно полимерной. Специфика их оптических свойств обусловлена двойным лучепреломлением жидкого кристалла (ЖК), отличным от такового у изотропных соединений, и особым расположением молекул ЖК внутри

капли. Явления двойного лучепреломления считается неотъемлемым свойством ЖК, поэтому ориентация молекул внутри капель ЖК зависит исключительно от межфазных сил, существующих на границе раздела с матрицей [1, 2]. Роль полимерной матрицы довольно сложна: она обеспечивает формирование жидкокристаллических капель, обеспечивает им механическую поддержку, определяет их сцепление, размер и распределение и, следовательно, оптические свойства капель, а также влияет на конечные оптические свойства ПДЖК благодаря их собственной химической структуре и свойствам. Применение ПДЖК-композитов в биомедицинских устройствах, требует использования биосовместимых материалов, что на сегодняшний день является малоизученным аспектом. Именно поэтому наши исследования направлены на получение ПДЖК-систем, свойства которых позволяют использовать их в биотехнологии. Целью данной работы было получение композитных плёнок ПДЖК на основе полимерной матрицы и ЖК 5CB и изучение их поверхности с целью выявления потенциальных областей применения.

В результате анализа исследований установили, что электронные спектры чистого ЖК 5CB имеют максимум поглощения при 281 нм, в то время как чистый ПВБ показал максимум поглощения при 281 нм и 268 нм. Как и ожидалось, максимум поглощения 5CB смещен в красный цвет по сравнению с ПВБ, что отражает расширенную конъюгацию ЖК.

По сравнению с чистыми композитными компонентами максимумы поглощения композитов ПДЖК имеют промежуточные значения (271 - 274 нм), в то время как спектральный профиль смещен в синюю сторону по сравнению с 5CB и в красную сторону по сравнению с ПВБ, что отражает соотношение двух компонентов и, возможно, роль межфазных сил. Максимум поглощения имеет небольшой сдвиг при уменьшении количества ЖК в композитах с 275 до 270 нм, что свидетельствует о менее плоской конформации 5CB по мере уменьшения размера капель и, следовательно, о менее агрегированном состоянии 5CB. Это может быть достигнуто за счёт межфазных взаимодействий, которые направляют молекулы 5CB от границы раздела фаз к центру капли и разрушают доминирующие димерные структуры чистого нематического 5CB [3]. Интенсивность полосы поглощения постепенно увеличивается, отражая растущее процентное содержание ЖК в композите.

Список литературы

1. Hsu T.C., Lu C.H., Huang Y.T., et al. // Sensor. Actuat. A Phys. 2011. V. 169. P. 341-346.
2. Srivastava J.K., Singh R.K., Dhar R., Singh S. // Liq. Cryst. 2012. V. 39. P. 1402-1413.
3. Marin L, Popescu M.C., Zabulica A., et al. // Carbohyd. Polym. 2023. V. 105. P. 16-24.

УДК 535(06)+004(06)

Д.М. ЧУБАРОВ, Ю.А. АЛТУХОВ, В.О. ДОЛГИРЕВ,
Д.С. РАСТРЫГИН, С.Н. ШАРАНГОВИЧ
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФРАКЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАННЫХ ДВУХСЛОЙНЫХ КПЖК ДИФРАКЦИОННЫХ СТРУКТУР ПРИ СЧИТЫВАНИИ ЛИНЕЙНО-ПОЛЯРИЗОВАННЫМ СВЕТОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

В данной работе представлен численный расчёт дифракционных характеристик мультиплексированных двухслойных КПЖК дифракционных структур при считывании линейно-поляризованной световой волной и воздействии внешнего электрического поля.

D.M. CHUBAROV, Yu.A. ALTUHOV, V.O. DOLGIREV,
D.S. RASTRYGIN, S.N. SHARANGOVICH
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

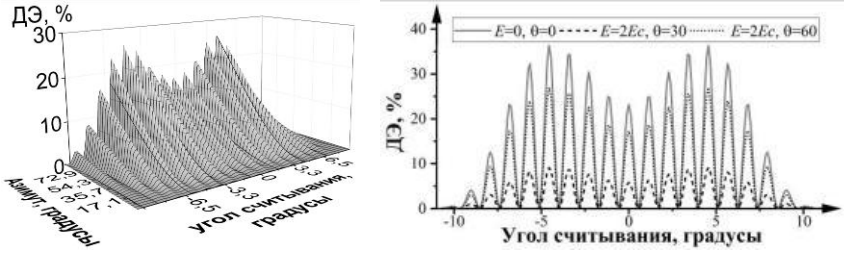
STUDY OF DIFFRACTION CHARACTERISTICS OF MULTIPLEXED TWO-LAYER PDLC DIFFRACTION STRUCTURES AT READING BY LINEARLY POLARIZED LIGHT RADIATION

This paper presents a numerical calculation of the diffraction characteristics of multiplexed bilayer PDLC diffraction structures when read by a linearly polarized light wave and when subjected to an external electric field.

В данной работе, на основе разработанной модели дифракции света на мультиплексированных многослойных неоднородных голографических дифракционных структурах (МНГДС) с капсулированными полимером жидкими нематическими кристаллами (КПЖК), показано преобразование селективных характеристик дифрагированного светового излучения при считывании линейно-поляризованной световой волной с различным углом азимута. Для численного моделирования использовалась двухслойная голографическая дифракционная структура (ГДС), в которой последовательно было записано две дифракционные структуры с углами записи $\Psi = \pm 5$ градусов. При численном моделировании использовались следующие параметры: $d_n = 15$ мкм – толщина КПЖК

слоя, t_n = 71,25 мкм – толщина промежуточного слоя, λ = 633 нм – длина волны считывающего излучения.

На рис. 1 приведены зависимости дифракционной эффективности (ДЭ) двухслойной ГДС от угла считывания и угла азимута поляризации считывающего излучения. Электрическая напряжённость на всех КПЖК слоях $E = 2E_c$, где E_c – критическая напряжённость Фредерикса.



а *б*

Рис. 1. Зависимость дифракционной эффективности от угла считывания (*а*) и азимута поляризации (*б*) считывающей световой волны

Исходя из рис. 1 можно сделать вывод о том, что воздействие электрического поля на КПЖК слои не вызывает существенного смещения угловой селективности, как для случая с фотополимерным материалом при высокой концентрации жидких кристаллов [2]. При считывании линейно поляризованной световой волной с азимутом θ = 0 ˚ ДЭ снижается до нуля при $E = 2E_c$, что показывает отсутствие дифракции на необыкновенных собственных волнах в образце. При считывании световой волной, состояние поляризации которой отличается от собственных необыкновенных волн в образце, ДЭ также снижается по уровню, но при увеличении угла азимута поляризации считывающего излучения, уровень ДЭ возрастает, что свидетельствует о дифракции света на обыкновенных собственных волнах, для которых воздействие электрического поля не оказывает влияния. Таким образом, управление дифракционными характеристиками таких структур возможно не только с помощью внешнего электрического поля, но также с помощью учёта состояния поляризации считывающего излучения.

Список литературы

1. Казак А.А., Мельникова Е.А., Толстик А.Л., Могильный В.В., Станкевич А.И. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. № 20. С. 1-7.

2. Sharangovich S.N., Dolgirev V.O., Rastrygin D.S. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2024. V. 88. No. 1. P. 6-12.

УДК 535(06)+004(06)

Д.М. ЧУБАРОВ, Ю.А. АЛТУХОВ, В.О. ДОЛГИРЕВ,
Д.С. РАСТРЫГИН, С.Н. ШАРАНГОВИЧ
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫМИ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАННЫМИ МНГДС НА ОСНОВЕ КПЖК

В данной работе представлены поляризационные характеристики дифрагированного светового излучения, полученные с помощью численного моделирования, основываясь на разработанной модели дифракции света на электрически управляемых мультиплексированных многослойных неоднородных голографических дифракционных структурах, сформированных в капсулированных полимером нематических жидких кристаллах.

D.M. CHUBAROV, Yu.A. ALTUHOV, V.O. DOLGIREV,
D.S. RASTRYGIN, S.N. SHARANGOVICH
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

TRANSFORMATION OF POLARIZATION CHARACTERISTICS OF LIGHT BEAMS BY ELECTRICALLY CONTROLLED MULTIPLEXED MIHDS BASED ON PDLC

In this paper, the polarization characteristics of the diffracted light field are presented using numerical modeling based on the developed model of light diffraction on electrically controlled multiplexed multilayer inhomogeneous holographic diffraction structures formed in polymer encapsulated nematic liquid crystals.

Основываясь на разработанной модели дифракции света на мультиплексированных многослойных неоднородных голографических дифракционных структурах (МНГДС) [1], сформированных в капсулированных полимером нематических жидких кристаллов (КПЖК) [2], было проведено численное моделирование преобразования поляризационных характеристик для дифрагированного в первый порядок светового излучения. Для численного расчёта использовалась двухслойная голографическая дифракционная структура, в которой были последовательно записаны две дифракционные решётки при углах поворота образца $\Psi = \pm 6.2$ градусов. Были рассчитаны распределения азимута (χ), эллиптичности (ρ) и дифракционной эффективности (θ)

дифрагированного светового излучения при углах азимута линейно-поляризованного считывающего светового излучения $\theta_{\text{п}} = \{30, 45, 60\}$ градусов, а также напряжённости электрического поля, приложенного на все КПЖК слои, равной $1.2E_c$ относительно критической напряжённости Фредерикса. При моделировании использовались следующие параметры: $d_n = 20$ и $t_n = 160$ мкм – толщина дифракционного и буферного слоя, $\lambda = 633$ нм – длина волны считывающего излучения.

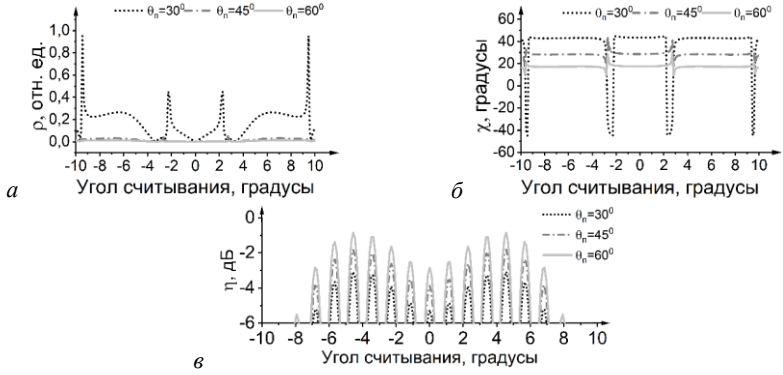


Рис. 1. Распределение эллиптичности (*а*), азимута (*б*) и дифракционной эффективности (*в*) дифрагированного светового излучения от угла считывания

Как видно из рис. 1*а, б*, распределение эллиптичности и азимута поляризации для дифрагированного излучения при изменении состояния поляризации считывающего излучения и при влиянии внешнего электрического поля на все КПЖК слои приводит к периодическому их изменению. Для угловой селективности (рис. 1*в*) изменение в состоянии поляризации считывающего излучения при одинаковом значении напряжённости электрического поля приводит к изменению значения дифракционной эффективности, что обусловлено вкладом дифракции света на обыкновенных волнах. Таким образом, при управлении дифракционными характеристиками мультиплексированными МНГДС с КПЖК с помощью внешнего электрического поля и состояния поляризации считывающего излучения состояние поляризации дифрагированного излучения может иметь существенные изменения.

Список литературы

1. Долгирев В.О., Шарангович С.Н., Растрыгин Д.С. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2024. Т. 88. № 1. С. 11-18.

2. Kazak A.A., Tolstik A.L., Melnikova E.A. // J. Opt. Technol. 2010. V. 77 (7). P. 461-462.

П.В. ДОЛГАНОВ, Н.В. БАЛЕНКО[1], В.К. ДОЛГАНОВ
Институт физики твёрдого тела им. Ю.А. Осипьяна РАН, Черноголовка
[1]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ФОТОИНДУЦИРОВАННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ФОТОННЫХ СВОЙСТВ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ

Приготовлены жидкокристаллические фотонные кристаллы, у которых период и спектральное положение фотонных зон можно изменять при помощи освещения. Изучены спектральные свойства полученных структур и фотоиндуцированные фазовые переходы.

P.V. DOLGANOV, N.V. BALENKO[1], V.K. DOLGANOV
Osipyan Institute of Solid State Physics of the RAS, Chernogolovka
[1]Lomonosov Moscow State University

PHOTOINDUCED TRANSFORMATION OF PHOTONIC PROPERTIES OF LIQUID CRYSTALS

We prepared liquid-crystalline photonic crystals whose periodicity and spectral position of the photonic zones can be modified by illumination. Spectral properties of the obtained structures and photoinduced phase transitions have been studied.

Хиральные жидкие кристаллы образуют ряд фотонно-кристаллических структур с нетривиальными оптическими свойствами. Примером одномерного фотонного кристалла служат холестерики со спиральным упорядочением молекул. Периодическая пространственная модуляция приводит к появлению фотонной зоны на длине волны $\lambda = pn$, где p – шаг спирали, n – средний показатель преломления. Холестерики с малым шагом спирали ($p < 300$ нм) вблизи перехода в изотропную фазу образуют голубые фазы с трёхмерной кубической структурой [1].

В последние годы значительный интерес вызывает возможность управления характеристиками хиральных жидких кристаллов с помощью светового воздействия [2]. В работе созданы и изучены фотоуправляемые жидкокристаллические фотонные структуры. Холестерики приготовлены на основе нематика E7, хирального вещества CB15 (Synton Chemicals, Германия) и синтезированной нами фотохромной хиральной добавки MeAzoSorb (рис. 1). Поведение хиральных структур исследовано в плоских оптических ячейках толщиной от 5 до 25 мкм. Основная часть измерений проведена в ячейках с нанесённым на внутренние поверхности

ориентирующим полиимидным покрытием, позволяющим получать монодоменные участки большой площади. Оптические и спектральные свойства образцов исследованы на установке с ПЗС-спектрометром Avantes. Термостатирование осуществлялось с помощью специально сконструированного термостатирующего устройства, позволяющего поддерживать температуру с точностью лучше 0.01 °C.

Модификация шага спирали холестерика проводилась путём освещения образцов с помощью лазерных диодов. При освещении светом ультрафиолетового диапазона (365 нм) молекулы MeAzoSorb испытывают транс-цис конфигурационный переход, приводящий к уменьшению их закручивающей способности, в результате чего шаг спирали холестерика увеличивается. Освещение светом видимого диапазона (455 нм) приводит к обратному переходу и к уменьшению шага спирали. В холестерической фазе с помощью освещения осуществлено обратимое смещение положения фотонной зоны во всём видимом диапазоне. Реализован фотоиндуцированный переход между холестериком, изотропной жидкостью и голубыми фазами. В образцах, допированных дихроичными красителями, прослежена трансформация спектров поляризованной люминесценции при изменении положения фотонной зоны.

Результаты работы указывают на значительный потенциал хиральных жидких кристаллов для создания светоуправляемых фотонных устройств.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-12-00200.

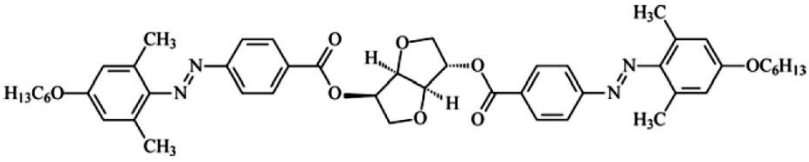


Рис. 1. Структура хирально-фотохромного вещества MeAzoSorb [2]

Список литературы

1. Wright D.C., Mermin N.D. // Rev. Mod. Phys. 1989. V. 61, P. 385.
2. Bobrovsky A., et al. // J. Mater. Chem. C. 2014. V. 2. P. 8622.

УДК 535(06)+004(06)

О.В. МАЛЫШКИНА, И.А. КАПЛУНОВ, В.Е. РОГАЛИН[1],
Г.И. КРОПОТОВ[2]
Тверской государственный университет
[1]Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург
[2]ООО «Тидекс», Санкт-Петербург

СРАВНЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ ГЕРМАНИЯ С РАЗЛИЧНОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ДИСЛОКАЦИЙ

В одном эксперименте, методом прямоугольной тепловой волны (TSWM), сопоставлены тепловые свойства германия с различной концентрацией дислокаций. Получено, что на бездислокационных кристаллах тепловые характеристики оказались выше, чем у традиционно используемых кристаллов марки ГМО.

O.V. MALYSHKINA, I.A. KAPLUNOV, V.E. ROGALIN[1],
G.I. KROPOTOV[2]
Tver State University
[1]Institute for Electrophysics and Electric Power of the RAS, Saint-Petersburg
[2]Tydex LLC, Saint-Petersburg

COMPARISON OF THERMAL PROPERTIES OF GERMANIUM WITH DIFFERENT DISLOCATION CONCENTRATIONS

In one experiment, the thermal properties of germanium with different dislocation concentrations were compared using the thermal square wave method (TSWM). It was found that the thermal characteristics of dislocation-free crystals were higher than those of the traditionally used GMO crystals.

До недавнего времени считалось, что теплопроводность является константой материала, зависящей от параметров окружающей среды, прежде всего от температуры. В инженерных расчётах обычно использовалось справочное значение, полученное при первоначальном исследовании материала, что в ряде случаев не соответствовало действительности. Развитие силовой электроники и оптики выявило необходимость получения материалов с высокой теплопроводностью, что привело к более тщательному изучению этого параметра с целью выявления возможностей его увеличения.

В работе исследован коэффициент тепловой диффузии (температуропроводности) монокристаллического Ge, являющегося одним

из наиболее чистых и досконально изученных материалов [1]. Метод измерения (метод прямоугольной тепловой волны – TSWM) заключается в измерении пироэлектрического тока, индуцированного в сегнетоэлектрическом кристалле (танталат лития), на который помещён германий, с помощью прямоугольно модулированного теплового потока (то есть при периодическом изменении температуры образца) [2]. Модуляция теплового потока, падающего на образец германия, осуществлялась импульсами прямоугольной формы частотами f = 0,1 Гц и f = 0,15 Гц. В качестве источника теплового излучения использовался ИК-лазер с длиной волны 920 нм.

Основной вклад в теплопроводность Ge вносит фононная составляющая. Свойства фононов заметно зависят от различных структурных дефектов, однако это чаще всего проявляется при низких температурах. Известно влияние изотопического беспорядка на теплопроводность Ge; изотопически чистый Ge при низких температурах имеет теплопроводность в 8.5 раз выше Ge природного состава. Понятно, что дислокации, будучи гораздо более заметным структурным дефектом, должны влиять на фононные процессы, числу которых относится теплопроводность.

Сравнивались образцы Ge промышленного (ГМО) и бездислокационного (БД) кристаллов разных ориентаций, а также поликристаллического (ГПО). Результаты приведены в табл. 1, где ρ – удельное электрическое сопротивление; k – коэффициент теплопроводности; α – коэффициент температуропроводности..Размеры всех образцов составляли 10 × 10 × 5 мм.

Таблица 1. Тепловые свойства исследованных образцов

Образец	Ориентация	ρ, Ом·см	k, Вт·м/град	α, 10^{-6} м^2/с
БД	{**1**0**0**}	20–25	87 ± 5	7 ± 0,5
ГМО	{100}	20–25	72 ± 5	6 ± 0,5
ГПО	{100}	20–25	75 ± 5	7 ± 0,5
БД	{111}	0,75	87 ± 5	7.5 ± 0,5
ГМО	{111}	0,75	80 ± 5	8 ± 0,5

Список литературы

1. Kropotov G., Rogalin V., Kaplunov I. // Crystals. 2024. V. 14. No. 9. P. 796.

2. Мовчикова А.А., Малышкина О.В., Калугина О.Н. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2012. № 1. С. 37-41.

УДК 535(06)+004(06)

Г.А. КОМАНДИН, И.И. БУЧИНСКАЯ[1], С.В. КУЗНЕЦОВ,
И.Е. СПЕКТОР, П.П. ФЕДОРОВ
Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва
[1]Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО CdF_2 В ДЛИННОВОЛНОВОЙ ОБЛАСТИ

Исследованы широкополосные спектры отражения и пропускания в диапазоне частот 3 - 5000 $см^{-1}$ монокристалла фторида кадмия CdF_2 высокой чистоты. С использованием моделей классического осциллятора и связанных осцилляторов рассчитаны параметры электрических дипольных процессов поглощения первого и второго порядков в терагерцовом и ИК-диапазонах, а также значения комплексного показателя преломления и диэлектрической проницаемости.

G.A. KOMANDIN, I.I. BUCHINSKAYA[1], S.V. KUZNETSOV,
I.E. SPECTOR, P.P. FEDOROV
Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow
[1]National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow

LONG-WAVELENGTH OPTICAL PROPERTIES OF THE CdF_2 SINGLE CRYSTAL

Broadband reflection and transmission spectra in the frequency range of 3 - 5000 cm^{-1} of a high-purity cadmium fluoride CdF_2 single crystal were studied. Using classical oscillator and coupled oscillator models, the parameters of first- and second-order electric dipole absorption processes in the THz–IR ranges were obtained. The values of the complex refractive index and dielectric constant were calculated.

Фторид кадмия CdF_2, как и фториды Ca, Sr, Ba и высокотемпературная модификация PbF_2, кристаллизуются в структуре типа флюорита, пространственная группа $Fm\bar{3}m$. Как и другие флюоритовые кристаллы, CdF_2 имеет широкие диапазоны пропускания от среднего ИК-диапазона до вакуумного ультрафиолета, а также в терагерцовом диапазоне [1]. Чистый CdF_2 является диэлектриком с шириной запрещённой зоны 7.6 эВ, однако при легировании легко приобретает полупроводниковые свойства [2]. Монокристаллы CdF_2, легированные Ga и In, являются эффективными материалами для оптической памяти и динамической голографии [3]. Материалы на основе CdF_2 являются люминофорами [4] и активными средами твердотельных лазеров [5].

Целью настоящей работы является определение оптических характеристик и функции диэлектрического отклика высокочистого монокристалла CdF_2 с использованием ИК и ТГц-спектроскопии.

Монокристалл для исследований был выращен из собственного расплава методом вертикальной направленной кристаллизации. Общий примесный состав определяли методом искровой масс-спектрометрии на двухфокусном масс-спектрометре JMS-01-BM2 производства JEOL. Содержание основного вещества в образце было не менее 99.99 %. Плоскопараллельная пластина, вырезанная из кристалла, исследована с помощью ИК-спектрометра с фурье-преобразованием Bruker IFS-113v. Полосы поглощения в ТГц- и ИК-спектрах пропускания и отражения проанализированы с использованием классической модели осциллятора.

В спектрах (рис. 1) обнаружены полосы поглощения, соответствующие связям C–O и C–H. Динамика кристаллической решётки CdF_2 более сложная, чем у других фторидов щёлочно-земельных металлов со структурой флюорита. Простая модель, описывающая динамику решётки фторидов Ca, Sr, Ba и их твёрдых растворов [6], для CdF_2 работает лишь частично. Причина этого, возможно, заключается в большой ковалентной составляющей химических связей во фториде кадмия. Сочетание малого параметра решётки с низкой энергией фононов делает CdF_2 весьма привлекательным для разработки ап-конверсионных люминофоров.

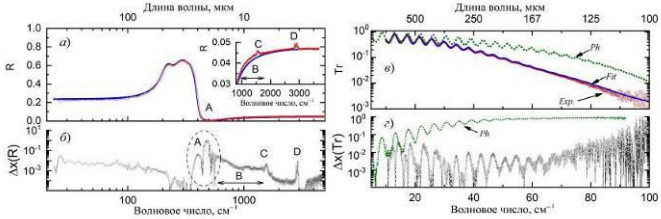


Рис. 1. Экспериментальные (точки) и модельные (сплошные линии) спектры отражения (*а*) и пропускания (*в*) монокристалла CdF_2, на вставке – увеличенная часть спектров отражения в среднем ИК-диапазоне; среднеквадратичное отклонение рассчитанных спектров в ИК- (*б*) и ТГц- (*г*) диапазонах пропускания

Список литературы

1. Haendler H.M., Wheeler C.M., Bernard W.J. // J. Opt. Soc. Am. 1953. V. 43(3). P. 215.
2. Prener J.S., Kingsley J.D. // J. Chem. Phys. 1963. V. 38(3). P. 667.
3. Ryskin A.I., Shcheulin A.S., Kaziarska B., et al. // Appl. Phys. Letters. 1995. V. 65(4). P. 31.
4. Boubekri H., et al. // Optical Components and Materials XV. SPIE. 2018. V. 10528. P. 384.
5. Kaminskii A.A. Laser Crystals Their Physics and Properties. Springer, 1990.
6. Axe J.D. // Phys. Rev. V. 1965. V. 139 (4A). P. A1215.

Т.Г. МАТВЕЕВА[3], Н.И. ПУЧКОВ[1], В.Г. СОЛОВЬЕВ[1,2] ,
А.В. ЦВЕТКОВ[1], М.В. ЯНИКОВ[1]
[1]*Псковский государственный университет*
[2]*Военная академия связи им. С.М. Буденного, Санкт-Петербург*
[3]*Филиал Псковского государственного университета, Великие Луки, Псковская обл.*

ОПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОКОМПОЗИТА СЕГНЕТОВА СОЛЬ / ОПАЛ

Спектры брэгговского отражения нового нанокомпозита сегнетова соль / опал показывают значительное длинноволновое смещение дифракционных максимумов по сравнению с их положением в исходной матрице. Наблюдался также низкотемпературный сдвиг точки Кюри T_C верхнего сегнетоэлектрического перехода вещества-гостя из-за ограниченной геометрии.

T.G. MATVEEVA[3], N.I. PUCHKOV[1], V.G. SOLOVYEV[1,2],
A.V. CVETKOV[1], M.V. YANIKOV[1]
[1]*Pskov State University*
[2]*S.M. Budyonny Military Academy of the Signal Corps, Saint-Petersburg*
[3]*Pskov State University branch, Velikiye Luki, Pskov region*

OPTICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF ROCHELLE SALT / OPAL NANOCOMPOSITE

The Bragg reflection spectra of the novel Rochelle salt / opal nanocomposite show a significant long-wavelength shift of the diffraction maxima compared to their positions in the host matrix. A low temperature shift of the Curie point T_C of the guest substance upper ferroelectric transition due to confined geometry has been also observed.

В работе получен новый нанокомпозит «сегнетоэлектрик / опал» путем введения сегнетовой соли из раствора в опал матричным методом [1]. Упорядоченная гранецентрированная кубическая (ГЦК) структура опала образована плотно упакованными сферами с радиусами 100 нм [2]. В видимой области спектра опалы могут выступать в роли трёхмерных фотонных кристаллов (ФК), в которых образование фотонных запрещённых зон приводит к появлению дифракционных максимумов в спектрах брэгговского отражения, которые смещаются в область коротких волн при увеличении угла падения θ в соответствии с формулой [3]

$$\lambda^2 = 4d^2n^2 - 4d^2\sin^2\theta, \qquad (1)$$

где $d = 0{,}816D$ – межплоскостное расстояние для плоскостей (111) ГЦК структуры опала, D – диаметр сфер, n – эффективный показатель преломления ФК. Зависимость (1) выполняется и в нашем случае (рис. 1). При этом в результате введения сегнетоэлектрика в опаловую матрицу с диаметром сфер $D \approx 250$ нм эффективный показатель преломления возрастает от значения $n_1 \approx 1{,}32$ до значения $n_2 \approx 1{,}45$.

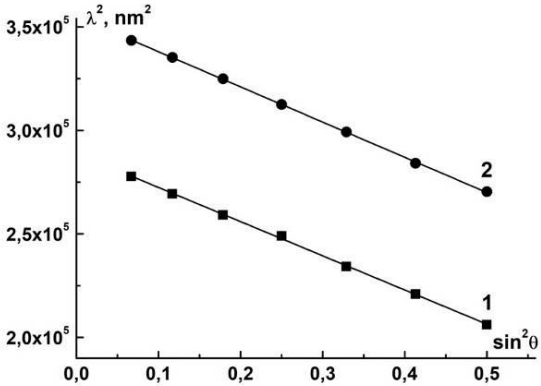


Рис. 1. Угловая дисперсия брэгговского резонанса первого порядка для исходной матрицы опала (кривая 1) и нанокомпозита «сегнетоэлектрик / опал» (кривая 2)

Ранее при введении сегнетовой соли в матрицу цеолита типа NaA мы наблюдали [4] низкотемпературный сдвиг точки Кюри T_C верхнего сегнетоэлектрического перехода на величину $\Delta T_C \approx 5$ К из-за влияния ограниченной геометрии. Как показывает эксперимент, в нанокомпозите «сегнетоэлектрик / опал» этот низкотемпературный сдвиг существенно меньше ($\Delta T_C \approx 1$ К) поскольку размеры пор в матрице опала на 1 – 2 порядка величины превышают размеры полостей в цеолитной матрице.

Список литературы

1. Astratov V.N., Bogomolov V.N., Kaplyanskii A.A., Prokofiev A.V., Samoilovich L.A., Samoilovich S.M., Vlasov Yu.A. Optical spectroscopy of opal matrices with CdS embedded in its pores: Quantum confinement and photonic band gap effects // Il Nuovo Cimento. 1995. V. 17D. No. 11-12. P. 1349-1354.

2. Балакирев В.Г., Богомолов В.Н., Журавлёв В.В., Кумзеров Ю.А., Петрановский В.П., Романов С.Г., Самойлович Л.А. // Кристаллография. 1993. Т. 38. № 3. С. 111-120.

3. Ванин А.И., Кумзеров Ю.А., Романов С.Г., Соловьев В.Г., Ханин С.Д., Цветков А.В., Яников М.В. // Оптика и спектроскопия. 2020. Т. 128. № 12. С. 1919-1925.

4. Матвеева Т.Г. Соловьев В.Г. Диэлектрические свойства наночастиц сегнетовой соли в матрице цеолита NaA // Техника радиосвязи. 2022. Вып. 4 (55). С. 118-124.

УДК 535(06)+004(06)

А.А. ШАХМИН, В.В. ГЕРАСИМОВА[1], С.Ф. МУСИХИН[1], Г.И. КРОПОТОВ
ООО «Тидекс», Санкт-Петербург
[1]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПОГЛОЩЕНИЕ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМ КРЕМНИИ

В терагерцовом диапазоне спектра экспериментально исследованы пропускание и отражение монокристаллического кремния. Определены оптические параметры кремния при различных уровнях легирования фосфором в области от 200 до 3000 мкм. Всего исследовано двенадцать пластин толщиной 5 мм и диаметром 50 мм.

A.A. SHAKHMIN, V.V. GERASIMOVA[1], S.F. MUSIKHIN[1], G.I. KROPOTOV
Tidex LLC, Saint-Petersburg
[1]Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

ABSORPTION OF TERAHERTZ RADIATION IN MONOCRYSTALLINE SILICON

The transmission and reflection of monocrystalline silicon were experimentally studied in the terahertz spectral range. The optical parameters of silicon were determined at different levels of phosphorus doping in the range from 200 to 3000 μm. A total of twelve wafers with a thickness of 5 mm and a diameter of 50 mm were studied.

Кремний– один из главных материалов современной электроники [1]. Для исследования взаимодействия терагерцового излучения с монокристаллическим кремнием мы использовали заготовки кремния диаметром 50 мм и толщиной 5 мм, изготовленные компанией ТЕРРА, Россия. Затем заготовки были отполированы с двух сторон в компании «Тидекс». Ориентация исследованных пластин, кроме #7, (100), пластина #7 имеет ориентацию (111). Кремний легирован фосфором, что даёт *n*-тип проводимости. Было исследовано двенадцать пластин с удельным сопротивлением от 0.2 до 10 Ом·см, результаты приведены в табл. 1. Исследованы спектры пропускания (T(λ)) и отражения (R(λ)) в области 1,11 - 3000 мкм. Спектры поглощения A(λ) получены как 1 - T(λ) - R(λ) (рис. 1), λ – длина волны излучения.

Таблица 1

№ образца (#)	1	2	3	4	5	6
Концентрация электронов, $см^{-3}$	$3,47 \cdot 10^{16}$	$1,51 \cdot 10^{16}$	$9,25 \cdot 10^{15}$	$6,54 \cdot 10^{15}$	$5,00 \cdot 10^{15}$	$3,33 \cdot 10^{15}$
№ образца (#)	7	8	9	10	11	12
Концентрация электронов, $см^{-3}$	$2,50 \cdot 10^{15}$	$1,67 \cdot 10^{15}$	$1,25 \cdot 10^{15}$	$8,33 \cdot 10^{14}$	$6,25 \cdot 10^{14}$	$5,00 \cdot 10^{14}$

На основе спектров отражения и поглощения путём численного решения системы нелинейных уравнений найден коэффициент поглощения α, спектр которого приведён на рис. 2. Поглощение в области 30 - 3000 мкм происходит на свободных электронах $\alpha = L(\lambda) + A_e(\lambda)n$ [2], где $L(\lambda)$ описывает переходы с участием фононов (8 - 30 мкм) (решёточное поглощение), A_e – сечение поглощения электронами, n – концентрация электронов. Поглощение в терагерцовой области спектра растёт с ростом концентрации электронов. При длинах волн выше длины волны плазменного резонанса растёт отражение и, следовательно, уменьшается доля поглощения. Изменение коэффициента поглощения α с длиной волны, как видно из рис. 2, соответствуют теории Друде [3].

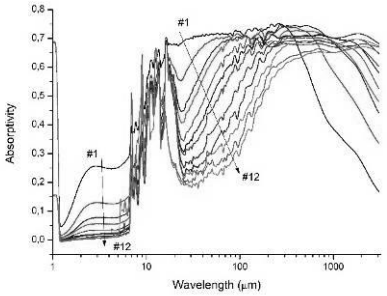


Рис. 1. Спектр поглощения Si пластин

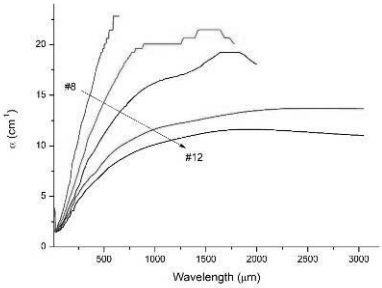


Рис. 2. Коэффициент поглощения α

Список литературы

1. Sze S.M., Ng K.K. Physics of Semiconductor Devices. New Jersey, USA: John Wiley &Sons, Hoboken, 2007.

2. Hatchinson C.J., et al. // Appl. Optics. 1982. V. 21. P. 1490.

3. Nashima S., et al. // Appl. Phys. Letters. 2001. V. 79. P. 3923.

УДК 535(06)+004(06)

В.В. ГАВРУШКО, М.А. ЗАХАРОВ, О.Р. КАДРИЕВ,
В.А. ЛАСТКИН[1], А.В. ПЕТРОВ[1]
Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого
[1]АО «ОКБ-Планета», Великий Новгород

О ВОЗМОЖНОСТЯХ ФОРМИРОВАНИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОДИОДОВ

Приведены результаты формирования спектральной характеристики для ряда вариантов изготовления фотодиодов на основе кремния. Показаны возможности производить коррекцию спектральной характеристики фотодиодов путём использования только групповых технологических операций полупроводникового производства, без применения внешних фильтров.

V.V. GAVRUSHKO, M.A. ZAHAROV, O.R. KADRIEV,
V.A. LASTKIN[1], A.V. PETROV[1]
Yaroslav-the-Wise Novgorod State University
[1]JSK «Planeta-OKB», Veliky Novgorod

ON THE POSSIBILITIES OF FORMING THE SPECTRAL CHARACTERISTICS OF SILICON PHOTODIODE

The results of spectral characteristic formation for a number of silicon photodiodes manufacturing variants are presented. Possibilities to correct the spectral characteristic of photodiodes by using only group technological operations of semiconductor production without external filters are shown.

Актуальным является изготовление фотоприёмников с требуемым спектральным диапазоном. В настоящем сообщении приведены полученные авторами результаты формирования спектральной характеристики для ряда вариантов изготовления кремниевых фотоприёмников. На рис. 1 приведена типичная спектральная чувствительность диффузионного фотодиода с глубиной залегания p-n перехода 2,2 мкм (кривая 1), для субмикронного перехода с глубиной 0,8 - 0,9 мкм (кривая 2), а также щирокодиапазонного ионно легированного p-n перехода с резким градиентом концентрации примесей на глубине около 0,2 мкм. (кривая 3). Снижение чувствительности фотоприёмника в длинноволновой области. может быть достигнуто путём создания тормозящего электрического поля для неосновных носителей, (рис. 2, кривая 1) [1]. Наиболее эффективного подавления

длинноволнового края чувствительности нам удалось добиться в дифференциальных фотоприёмниках [2]. На рис. 3 приведены характеристики ряда вариантов изготовления дифференциальных фотоприёмников.

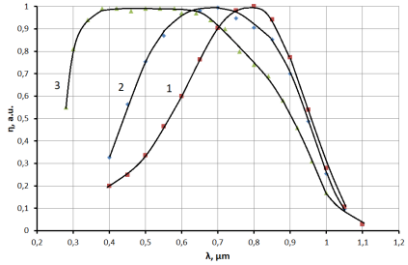


Рис. 1. Классические фотодиоды

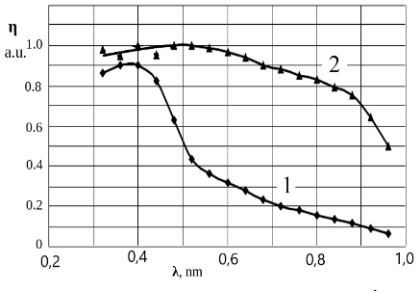


Рис. 2. Фотодиоды с тормозящим полем

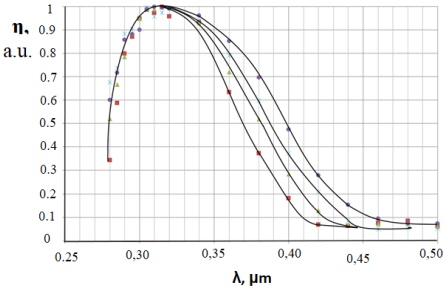


Рис. 3. Дифференциальные фотодиоды

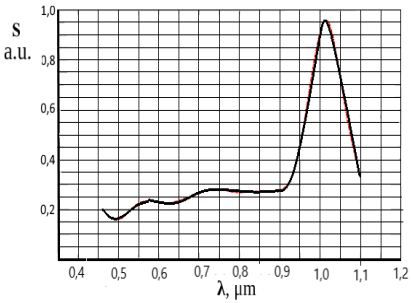


Рис. 4. Фотодиод с глубоким p-n переходом

Для снижения чувствительности в коротковолновой области можно использовать технологию создания глубокого p-n перехода. На рис. 4 приведена спектральная характеристика фотодиода с p-n переходом, созданным на тыльной стороне пластины.

Список литературы

1. Гаврушко В.В. и др. // Наука, технология бизнес. 2010. Т. 100 (2). С. 72.
2. Гаврушко В.В. и др. // ЖТФ. 2023. Т. 93 (9). С. 1353-1363.

УДК 535(06)+004(06)

Р.А. ТИТОВ, М.В. СМИРНОВ, А.С. КРЫЛОВ[1], А.Н. ВТЮРИН[1], И.В. БИРЮКОВА, С.М. МАСЛОБОЕВА, Н.В. СИДОРОВ, М.Н. ПАЛАТНИКОВ

Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева Кольского научного центра РАН, Апатиты, Мурманская обл.
[1]Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ МОНОКРИСТАЛЛОВ $LiNbO_3$:Zn:Mg РАЗНОГО ГЕНЕЗИСА

Используя данные спектроскопии комбинационного рассеяния света выполнен сравнительный анализ особенностей локализации точечных дефектов в кристалле $LiNbO_{3стех}$ и в кристаллах $LiNbO_3$:Zn:Mg(3.45:1.41 и 3.45:1.22 мол%), полученных по технологиям гомогенного и прямого легирования. Показано, что вследствие локализации легирующих элементов в базовых позициях лития катионная подрешётка кристаллов $LiNbO_3$:Zn:Mg более разупорядочена по сравнению с катионной подрешёткой кристалла $LiNbO_{3стех}$.

R.A. TITOV, M.V. SMIRNOV, A.S. KRYLOV[1], A.N. VTYURIN[1], I.V. BIRYUKOVA, S.M. MASLOBOEVA, N.V. SIDOROV, M.N. PALATNIKOV

I.V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Material of Kola Science Center of the RAS, Apatity, Murmansk region
[1]Kirensky Institute of Physics of Krasnoyarsk Science Center of Siserian Branch of the RAS

STRUCTURAL FEATURES OF $LiNbO_3$:Zn:Mg SINGLE CRYSTALS OF DIFFERENT GENESIS

A comparative analysis of the localization features of point defects in the $LiNbO_{3stoich}$ crystal and in $LiNbO_3$:Zn:Mg(3.45:1.41 and 3.45:1.22 mol %) crystals obtained by homogeneous and direct doping technologies was performed using Raman spectroscopy. It is shown that the cation sublattice of $LiNbO_3$:Zn:Mg crystals is more disordered compared to the cation sublattice of $LiNbO_{3stoich}$ crystal due to the localization of doping elements in the intrinsic positions of lithium.

Перспективным способом снижения эффекта фоторефракции в кристаллах ниобата лития ($LiNbO_3$) является введение в его структуру сразу двух различных «нефоторефрактивных» элементов, например, Mg и Zn. В работе [1] было установлено, что кристаллы двойного легирования $LiNbO_3$:Zn:Mg(3.45:1.41 и 3.45:1.22 мол.%) обладают высокими

оптической однородностью и сопротивлением к повреждению лазерным излучением. Сравнительный анализ спектров комбинационного рассеяния света (КРС) в геометрии рассеяния Y(ZX)Y данных кристаллов и кристаллов $LiNbO_3$:Zn(5.19 мол.%) и $LiNbO_3$:Mg(5.1 мол.%) позволил установить, что при двойном легировании влияние на катионную подрешётку упорядочивающего механизма Mg преобладает над влиянием разупорядочивающего механизма Zn [1]. При этом при введении в кристалл легирующих элементов в концентрации, близкой к пороговым значениям (для одинарного легирования Zn – 3.95 и 5.19 мол.% [2]), может наблюдаться снижение химической, композиционной, оптической и структурной однородностей. В связи с этим актуальны исследования, направленные на выявление особенностей структуры кристаллов $LiNbO_3$:Zn:Mg, полученных по разным технологиям легирования.

Кристаллы $LiNbO_3$:Zn:Mg(3.45:1.41 и 3.45:1.22 мол.%), полученные по технологиям гомогенного и прямого легирования, были выращены методом Чохральского на ростовой установке «Кристалл-2» [1]. Спектры КРС были зарегистрированы на спектрографе Horiba Jobin-Yvon T64000 в геометрии рассеяния Y(ZZ)Y. Для возбуждения спектров был использован лазер Spectra-Physics Excelsior 532-300-CDRH (λ = 532.0 нм, P = 5 мВт). В качестве объекта сравнения был выбран кристалл стехиометрического состава ($LiNbO_{3стех}$, R=[Li]/[Nb] = 1), выращенный из расплава, содержащего 58.6 мол.% Li_2O. В спектрах КРС кристаллов $LiNbO_3$:Zn:Mg(3.45:1.41 и 3.45:1.22 мол.%) в геометрии рассеяния Y(ZZ)Y, в которой проявляются фундаментальные колебания A_1(TO)-типа симметрии, обнаружены все четыре линии, разрешённые правилами отбора: 252, 274, 330 и 632 $см^{-1}$, соответствующие колебаниям ионов Nb и Li вдоль полярной оси Z кристалла и колебаниям ионов кислорода. При этом полуширина линий с частотами 252 и 274 $см^{-1}$ увеличивается при переходе от кристалла $LiNbO_{3стех}$ к кристаллам $LiNbO_3$:Zn:Mg(3.45:1.41 и 3.45:1.22 мол.%): 15, 20 и 21 $см^{-1}$; 11, 17 и 17 $см^{-1}$. Полученные данные свидетельствуют о разупорядочении катионной подрешётки кристаллов $LiNbO_3$:Zn:Mg по сравнению с катионной подрешёткой кристалла $LiNbO_{3стех}$. Это связано с локализацией легирующих элементов в базовых позициях лития вдоль полярной оси кристалла $LiNbO_3$.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-13-20004, https://rscf.ru/project/24-13-20004/.

Список литературы

1. Титов Р.А., Смирнов М.В. и др. // Перспективные материалы. 2024. № 8. С. 5.

2. Палатников М.Н., Сидоров Н.В. и др. Фундаментальные аспекты технологии сильно легированных кристаллов ниобата лития. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2017.

УДК 535(06)+004(06)

Д.В. КУЗЕНКО
Научно-исследовательский институт «Реактивэлектрон», Донецк

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЭНЕРГИИ АКТИВАЦИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ НИОБАТА ЛИТИЯ

Для кристаллов ниобата лития определены температурные зависимости энергии активации показателя преломления и диэлектрической проницаемости. Эти результаты важны для учёта вкладов электронной и ионной поляризуемости, а также электрон-фононного взаимодействия в электрооптический и фоторефрактивный эффекты сегнетоэлектриков кислородно-октаэдрического типа.

D.V. KUZENKO
Research Institute «Reaktivelektron», Donetsk

TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE ACTIVATION ENERGY OF DIELECTRIC PERMITTIVITY AND REFRACTIVE INDEX OF LITHIUM NIOBATE

Temperature dependences of the activation energy of the refractive index and dielectric permittivity have been determined for lithium niobate crystals. These results are important for taking into account the contributions of electron and ion polarizability, as well as electron-phonon interaction, to the electro-optical and photorefractive effects of oxygen-octahedral ferroelectrics.

Изучение влияния температуры на диэлектрические и оптические свойства кристаллов $LiNbO_3$ обусловлены его применением в качестве оптического материала. Несмотря на исследования [1, 2], вопрос о причинах нелинейности температурных зависимостей диэлектрической проницаемости и показателя преломления кислородно октаэдрических сегнетоэлектриков остается открытым. Исходя из этого в работе определены температурные зависимости энергии активации диэлектрической проницаемости $U_\varepsilon(T)$ и показателя преломления $U_n(T)$ монокристаллов $LiNbO_3$. Для этого использованы температурные зависимости диэлектрической проницаемости $\varepsilon(T)$, измеренной вдоль ε_3 и перпендикулярно ε_1 полярной оси на частоте 75 МГц [3], а также показателей преломления $n(T)$ обыкновенного n_o и необыкновенного n_e лучей для линии ртути (546,1 нм) [4]. Анализ зависимостей $\varepsilon(T)$ и $n(T)$ с учётом температурно-активационной природы диэлектрического отклика

сегнетоэлектриков и взаимосвязи $n \sim \varepsilon^{1/2}$ [5] позволил получить зависимости $U_\varepsilon(T)$ (рис. 1) и $U_n(T)$ (рис. 2). Эти результаты могут быть использованы при оценки вкладов электронной и ионной поляризуемости, а также электрон-фононного взаимодействия в электрооптический (ЭО) и фоторефрактивный эффекты сегнетоэлектриков кислородно октаэдрического типа ABO_3. Несмотря на важность октаэдрического блока $B0_6$ в микроскопической тензорной теории ЭО-эффектов [6], предполагается, что доминирующий вклад в ЭО-эффект имеет добавочный член, обусловленный электрон-фононным взаимодействием между колебаниями решётки и движением электронов [7]. В электронной теории функционала плотности для кристаллов $LiNbO_3$ показано, что основной вклад в ЭО-эффект вносят относительные смещения центрального иона металла (Li) и кислорода в октаэдре NbO_6, вызванные низкочастотным электрическим полем. Эти смещения изменяют зонные волновые функции электронов посредством электрон-фононной связи, что вызывает изменение показателя преломления [8]. Установленные четыре температурных интервала постоянства энергий активации U_ε и U_n могут быть проявлением активационных процессов электронного и ионного отклика кристалла, а также электрон-фононного взаимодействия в нём.

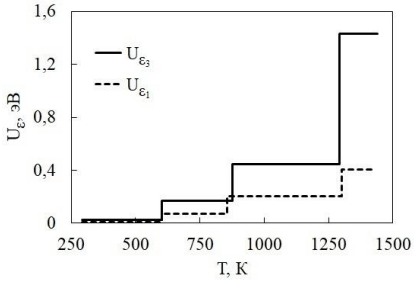


Рис. 1. Температурная зависимость энергии активации диэлектрической проницаемости ε_3 и ε_1 $LiNbO_3$

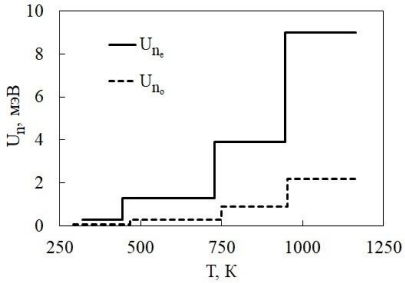


Рис. 2. Температурная зависимость энергии активации показателя преломления n_e и n_o $LiNbO_3$

Список литературы

1. Palatnikov M.N., et al. // Inorg. Mater. 2020. V. 56. (9). P. 955-961.
2. Zhu D., et al. // Opt. Commun. 2007. V. 272. P. 391-394.
3. Smolenskii G.A., et al. // Phys. Stat. Sol. 1966. V. 13. P. 309-314.
4. Bodnar I.T., Yarunichev V.P. // Proc. SPIE. 2001. V. 4467. P. 357-365.
5. Kuzenko D.V. // BRAS: Physics. 2024. V. 88. (5). P. 715-720.
6. DiDomenico M., Wemple S.H. // J. Appl. Phys. 1969. V. 40. (2). P. 720-734.
7. Chen C., et al. // Chem. Phys. Lett. 2004. V. 397. P. 222-226.
8. Meng X.Y., et al. // J. Appl. Phys. 2007. V. 101. P. 103506.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. КАДЕТОВА[1,2], О.В. ТОККО[1], М.Н. ПАЛАТНИКОВ[2], С.А. ЧИСТЯКОВА[1]

[1]*Петрозаводский государственный университет*

[2]*Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева Кольского научного центра РАН, Апатиты, Мурманская обл.*

ИЗМЕНЕНИЕ ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЫ КРИСТАЛЛОВ НИОБАТА ЛИТИЯ ПРИ ЛЕГИРОВАНИИ ИХ ДИСПРОЗИЕМ

Методом рентгеноструктурного анализа установлена дефектная структура кристаллов ниобата лития с низким (0.056 мол.%) и высоким (2.63 мол.%) содержанием диспрозия. Показано, что с увеличением концентрации Dy заметно увеличивается количество дефектов в пустом кислородном октаэдре ($Nb_{□}$), уменьшается концентрация антиструктурного дефекта - Nb_{Li} и изменяются параметры элементарной ячейки.

A.V. KADETOVA[1,2], O.V. TOKKO[1], M.N. PALATNIKOV[2], S.A. CHISTYAKOVA[1]

[1]*Petrozavodsk State University*

[2]*I.V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Material of Kola Science Center of the RAS, Apatity, Murmansk region*

CHANGES IN THE DEFECT STRUCTURE OF LITHIUM NIOBATE CRYSTALS DOPED WITH DYSPROSIUM

The defect structure of lithium niobate crystals with low (0.056 mol %) and high (2.63 mol %) concentration of dysprosium was established using X-ray structural analysis. It was shown that with an increase in the concentration of Dy, the number of defects in the empty oxygen octahedron ($Nb_{□}$) increases significantly, the concentration of the antistructural Nb_{Li} defect decreases, and the unit cell parameters change.

Исследованию кристаллов ниобата лития, легированных редкоземельными элементами (РЗЭ), посвящено множество работ [1, 2]. Выступая в качестве матрицы, обладающей высокими нелинейно-оптическими коэффициентами, легированные РЗЭ кристаллы ниобата лития способны генерировать и усиливать излучение [1, 2]. $LiNbO_3$:Dy излучает интенсивную ап-люминесценцию на излучательных переходах Dy в видимой области спектра, что позволяет использовать такие кристаллы в качестве среды для твердотельных лазеров [3].

Целью данной работы являлся анализ изменения дефектной структуры ниобата лития при добавлении малой (0.056 мол.%) и высокой

(2.63 мол.%) концентрации Dy в кристалл. Исследуемые кристаллы $LiNbO_3$:Dy были получены сотрудниками лаборатории материалов электронной техники ИХТРЭМС КНЦ РАН.

Методом полнопрофильного анализа порошковых рентгенограмм, с использованием программного комплекса MRIA [4], были установлены позиции примеси и собственных дефектов в структуре исследуемых кристаллов (рис. 1). Рентгенограммы регистрировались на дифрактометре ДРОН-6 в медном монохроматизированном излучении (λ = 1.54178 Å) в интервале углов рассеяния 2θ от 5 до 145 °.

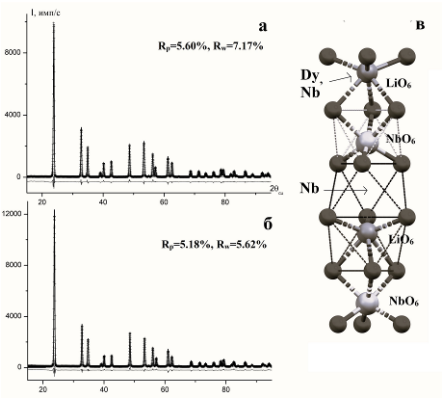


Рис. 1. Графический результат полнопрофильного анализа образцов $LiNbO_3$ [Dy] = 0.056 мол.% (а), [Dy] = 2.63 мол.% (б); схема расположения собственных и примесных дефектов в структуре исследуемых кристаллов (в)

С увеличением концентрации Dy изменяются параметры элементарной ячейки: a = 5.147(4) Å, c= 13.856(2) Å, V = 317.93 Å^3 – для образца с концентрацией [Dy] = 0.056 мол.%; a = 5.168(3) Å, c = 13.836(2) Å, V = 320.06 Å^3 – для образца с [Dy] = 2.63 мол.%, таким образом, значение периода a увеличивается, а периода c уменьшается в обоих случаях.

Дефектная структура исследуемых образцов описывается следующей моделью: примесные атомы Dy и Nb занимают позиции лития, часть атомов Nb занимают позицию пустого октаэдра ($Nb_□$). С увеличением концентрации диспрозия заселенность Nb_{Li} уменьшается с 0.01 до 0.004, а заселенность $Nb_□$ увеличивается с 0.0077 до 0.0295.

Список литературы

1. Lovisa L.X., Nunes T.B.O., et al. // Appl. Phys. A. 2024. V. 130. P. 226.
2. Sánchez-Dena O., Villalobos-Mendoza S.D., et al. // Crystals. 2020. V. 10. No. 11. P. 990.
3. Li D., Lin Z., et al. // Crystal Research and Technology. 2024. V. 59. P. 2300255.
4. Zlokazov V.B., Chernyshev V.V. // J. Appl. Crystall. 1992. V. 25. P. 447.

УДК 535(06)+004(06)

С.М. ШАНДАРОВ, М.Г. КИСТЕНЕВА, А.С. АКРЕСТИНА,
В.Г. ДЮ, Э.В. КОМОВ
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

ВЛИЯНИЕ ДИФФУЗИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ МЕДЬЮ НА СПЕКТРАЛЬНУЮ ЗАВИСИМОСТЬ УСРЕДНЁННОГО ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В ПЛАСТИНАХ НИОБАТА ЛИТИЯ

Исследованы спектральные зависимости оптического поглощения в кристаллах $LiNbO_3$:Cu *X*-среза, полученных диффузионным легированием в атмосфере аргона при температурах 600 и 700 ºС. Из значений оптического поглощения на длинах волн 477 и 1040 нм определены усреднённые концентрации ионов Cu^+ и Cu^{2+}.

S.M. SHANDAROV, M.G. KISTENEVA, A.S. AKRESTINA,
V.G. DYU, E.V. KOMOV
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

EFFECT OF DIFFUSION COPPER DOPING ON THE AVERAGE OPTICAL ABSORPTION SPECTRUM IN LITHIUM NIOBATE PLATES

The aim of this work was to experimentally investigate the spectral dependence of optical absorption in diffusion-doped $LiNbO_3$:Cu crystal. These crystals were doped by copper diffusion in an argon atmosphere at temperatures of 600 and 700 ºC. The average concentrations of Cu^+ and Cu^{2+} ions were determined using optical absorption values at wavelengths of 477 and 1040 nm.

Диффузионное легирование медью кристаллов ниобата лития существенно улучшает его фотовольтаические свойства и увеличивает фоторефрактивную чувствительность [1 - 3]. Важными характеристиками полученных диффузией образцов $LiNbO_3$:Cu являются концентрации донорных и ловушечных центров, которыми считаются ионы меди в зарядовых состояниях Cu^+ и Cu^{2+} соответственно. Эти концентрации, зависящие от условий диффузии, могут быть определены из значений оптического поглощения на длинах волн 477 и 1040 нм [1].

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований спектральных зависимостей усреднённого по координате *y* оптического поглощения в пластинах *X*-среза $LiNbO_3$:Cu, созданного

диффузионным легированием из металлической плёнки в атмосфере аргона при температурах 600 и 700 ºС.

В экспериментах использовались три оптически полированные пластины из ниобата лития *X*-среза с толщиной 2 мм. Пластина 1 оставалась нелегированной, а на каждую из *X*-поверхностей пластин 2 и 3 наносились плёнки меди толщиной 800 нм методом магнетронного распыления. Далее в атмосфере аргона проводилась диффузия при температурах 600 и 700 ºС для пластин 2 и 3 соответственно в течение 12 часов. Спектральные зависимости оптического пропускания образцов регистрировались на спектрофотометре СФ-56 в диапазоне 310 - 1100 нм.

Спектральные зависимости оптического поглощения в нелегированном и легированных образцах представлены на рис. 1. Из рис. 1 видно, что легирование медью кристалла $LiNbO_3$ приводит к значительному увеличению оптического поглощения как в диапазоне 315 - 600 нм, так и на длинах волн от 800 до 1100 нм вследствие примесного поглощения центрами Cu^+ и Cu^{2+} [1, 2] соответственно. Значения поглощения на длинах волн 477 и 1040 нм позволили по известным соотношениям [1] оценить концентрации ионов Cu^+ и Cu^{2+}, которые приведены в табл. 1.

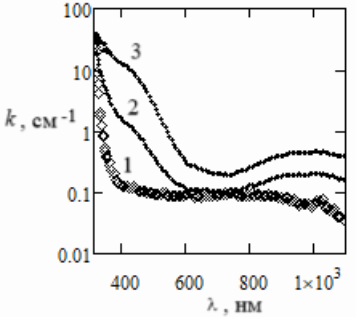


Рис. 1. Спектральные зависимости показателя поглощения в кристалле ниобата лития: 1 – чистый образец, 2 и 3 – легированные медью при T_1 = 600 ºС и T_2 = 700 ºС

Таблица 1

	C_{Cu+}, м$^{-3}$	C_{Cu2+}, м$^{-3}$
T_1=600 °С	$1{,}12\cdot10^{23}$	$1{,}28\cdot10^{24}$
T_2=700 °С	$8{,}73\cdot10^{23}$	$3{,}00\cdot10^{24}$

Таким образом, проведённые эксперименты показали, что концентрации ионов Cu^+ и Cu^{2+} растут с температурой отжига.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки и высшего образования Российской Федерации в рамках Госзадания FEWM-2023-012 на 2023 - 2025 гг.

Список литературы

1. Peithmann K., Hukriede J., Buse K., Krätzig E. // Phys. Rev. 2000. V. 61 (7). P. 4615.

2. Мамбетова К.М. и др. / Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2014. Т. 57. № 8-9. С. 675.

3. Шандаров С.М. и др. // Тезисы докл. XXI Межд. конф. по голографии и прикл. оптич. технологиям ХОЛОЭКСПО 2024. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024. С. 270-273.

М.В. СМИРНОВ[1], Р.А. ТИТОВ[1], Н.В. СИДОРОВ[1],
М.Н. ПАЛАТНИКОВ[1], А.В. КАДЕТОВА[1,2], О.В. ТОККО[2],
В.Б. ПИКУЛЕВ[2]

[1]Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева Кольского научного центра РАН, Апатиты, Мурманская обл.
[2]Петрозаводский государственный университет

ПОРОГОВЫЕ ЭФФЕКТЫ В СПЕКТРАХ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КРИСТАЛЛОВ $LiNbO_3$:Zn:Mg ОДИНАРНОГО И ДВОЙНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

Проведён сравнительный анализ спектров фотолюминесценции кристаллов $LiNbO_3$:Zn(0.04, 5.19), $LiNbO_3$:Mg(0.19, 5.23) и $LiNbO_3$:Zn(4.07):Mg(1.16 мол.%). Показано, что проявление пороговых концентрационных эффектов в спектрах фотолюминесценции исследуемых образцов обусловлено «синим» смещением полосы люминесценции при 2.0 эВ.

M.V. SMIRNOV[1], R.A. TITOV[1], N.V. SIDOROV[1], M.N. PALATNIKOV[1],
A.V. KADETOVA[1,2], O.V. TOKKO[2], V.B. PIKULEV[2]

[1]I.V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Material of Kola Science Center of the RAS, Apatity, Murmansk region
[2]Petrozavodsk State University

THRESHOLD EFFECTS IN THE PHOTOLUMINESCENCE SPECTRA OF SINGLE AND DOUBLE DOPED $LiNbO_3$:Zn:Mg CRYSTALS

A comparative analysis of the photoluminescence spectra of $LiNbO_3$:Zn(0.04. 5.19), $LiNbO_3$:Mg(0.19. 5.23) and $LiNbO_3$:Zn(4.07): Mg(1.16 mol %) crystals was conducted. It was shown that threshold concentration effects in the photoluminescence spectra of the studied samples were due to the "blue" shift of the luminescence band at 2.0 eV.

Легированные кристаллы ниобата лития ($LiNbO_3$) в качестве функционального материала находят широкое применение в различных областях техники благодаря уникальному сочетанию физических свойств с возможностью их регулировки концентрацией и типом легирующей примеси. Например, легирование Zn(Mg) кристалла $LiNbO_3$ позволяет уменьшить эффект фоторефракции и снизить значение коэрцитивного поля в несколько раз [1], что важно для оптических приложений. Однако при одинарном и двойном легировании физические свойства $LiNbO_3$

меняются скачкообразно в зависимости от концентрации легирующих элементов. Поэтому, цель данной работы – исследование пороговых эффектов в спектрах фотолюминесценции кристаллов $LiNbO_3$:Zn(0.04, 5.19), $LiNbO_3$:Mg(0.19, 5.23) и $LiNbO_3$:Zn(4.07):Mg(1.16 мол.%).

Исследуемые кристаллы были выращены методом Чохральского в воздушной атмосфере [2]. Легирующие оксиды ZnO и MgO добавляли в шихту $LiNbO_3$ конгруэнтного состава ([Li]/[Nb] = 0.946) перед этапом наплавлением тигля [2]. Спектры фотолюминесценции (λ = 380 - 700 нм) образцов регистрировались с помощью спектрографа SOL SL-100M, оснащённого ПЗС-матрицей FLI ML 1107 BlackIlluminated. Источник возбуждения люминесценции – He-Cd лазер ($\lambda_{возб}$ = 325 нм, 15 мВт).

На рис. 1 представлены спектры фотолюминесценции исследуемых кристаллов относительно кристалла $LiNbO_{3конг}$. Спектры состоят из широкой полосы при 2.0 эВ, которая связана с оптическими переходами биполярона Nb_{Li} - Nb_{Nb}. В кристалле $LiNbO_{3конг}$ фотолюминесценция является максимальной за счёт большого количества дефектов Nb_{Li} (~ 1 мол.%). В кристаллах $LiNbO_3$:Zn(0.04) и $LiNbO_3$:Mg(0.19 мол.%) происходит уменьшение интенсивности полосы за счёт уменьшения дефектов Nb_{Li}. Рост концентрации легирующей примеси приводит к смещению полосы $\sim 2.0 \rightarrow 2.5$ эВ вследствие перехода концентрации примесей через пороговые значения. В спектре кристалла $LiNbO_3$:Zn:Mg наблюдается полоса при ~ 2.5 эВ, которая обусловлена превышением концентрации Zn порогового значения. Роль Mg в структуре кристалла можно соотнести с замещением магнием дефектов Nb_{Li}. Следовательно, изменения скачком люминесцентных свойств в $LiNbO_3$:Zn:Mg, по-видимому, можно добиться при меньших концентрациях легирующих примесей, чем в кристаллах одинарного легирования.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-13-20004, https://rscf.ru/project/24-13-20004/.

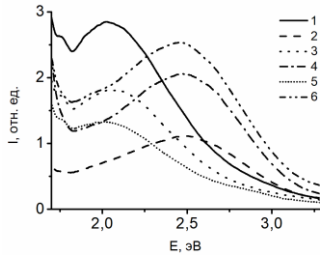


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции исследуемых образцов: 1 – $LiNbO_{3конг}$, 2 – $LiNbO_3$:Mg(5.23), 3 – $LiNbO_3$:Mg(0.19), 4 – $LiNbO_3$:Zn(5.19), 5 – $LiNbO_3$:Zn(0.04), 6 – $LiNbO_3$:Zn(4.07),Mg(1.16 мол.%).

Список литературы

1. Gopalan V., Mitchell T.E., et al. // Applied Physics Letters. 1998. V. 72. P. 1981.
2. Palatnikov M.N., Birukova I.V., et. al. // Journal of Crystal Grown. 2014. V. 386. P. 113.

Д.Е. БЕЛЬСКАЯ, Е.Н. САВЧЕНКОВ, А.В. ДУБИКОВ,
С.М. ШАНДАРОВ
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

БРЭГГОВСКАЯ ДИФРАКЦИЯ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО ГАУССОВА ПУЧКА НА РЕГУЛЯРНЫХ ДОМЕННЫХ СТРУКТУРАХ С НАКЛОННЫМИ СТЕНКАМИ В КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ

Получены соотношения, описывающие распределение возмущений компоненты диэлектрического тензора $\delta\varepsilon_{33}(x, z)$, создаваемых регулярной доменной структурой (РДС) с наклонными стенками в кристалле ниобата лития в области, ограниченной вдоль полярной оси Z соответствующим размером зондирующего эллиптического гауссова светового пучка. Результаты проведённого анализа могут быть использованы для описания особенностей брэгговской дифракции такого пучка на РДС со стенками, наклонёнными на угол α к полярной оси кристалла.

D.E. BELSKAYA, E.N. SAVCHENKOV, A.V. DUBIKOV,
S.M. SHANDAROV
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

BRAGG DIFFRACTION OF AN ELLIPTICAL GAUSSIAN BEAM ON REGULAR DOMAIN STRUCTURES WITH INCLINED WALLS IN A LITHIUM NIOBATE CRYSTAL

The relations describing the distribution of perturbations of the components of the dielectric tensor $\delta\varepsilon_{33}(x, z)$ created by a regular domain structure (RDS) with inclined walls in a lithium niobate crystal in a region bounded along the polar Z axis by the size of a probing elliptical Gaussian light beam were obtained in this work. The results of the analysis can be used to describe the features of the Bragg diffraction of such a beam on an RDS with walls inclined to the polar axis.

Зависимость эффективности дифракции Брэгга на регулярной доменной структуре (РДС) с наклонными стенками в кристалле 5%MgO:$LiNbO_3$ от положения зондирующего эллиптического гауссова пучка вдоль полярной оси z экспериментально наблюдалась в [1] для пространственных гармоник с номерами $m = 1$ и $m = 2$. В настоящем сообщении представлены результаты анализа пространственных спектров для возмущений компоненты диэлектрического тензора $\delta\varepsilon_{33}(x, z)$ $\delta\varepsilon_{33}(x, z)$, создаваемых РДС такого вида, с разложением на дискретные гармоники по координате x, для области кристалла по оси Z,

определяемой размером и положением вдоль неё зондирующего лазерного пучка. Воспользуемся описанным в [2] подходом, основанным на фурье-разложении по дискретным пространственным гармоникам возмущений, создаваемых РДС с наклонными стенками,

$$\delta\varepsilon_{33}(x,z) = n_e^4 P_S^2 R_{33}\left\{\mathrm{ch}^{-2}\left[\frac{x+\Lambda_x/4+(z_0-z)\,\mathrm{tg}\,\alpha}{\omega_0}\right]+\mathrm{ch}^{-2}\left[\frac{x-\Lambda_x/4-(z_0-z)\,\mathrm{tg}\,\alpha}{\omega_0}\right]\right\}, \quad (1)$$

где Λ_x – период РДС, а плоскость $z = z_0$ соответствует сечению, в котором размеры переключенной и исходной областей кристалла одинаковы и равны $\Lambda_x/2$; ω_0 – половинная толщина доменной стенки; n_e – необыкновенный показатель преломления и R_{33} – квадратичная электрооптическая постоянная кристалла; P_S – спонтанная поляризация. Его применение к РДС с конечным значением ω_0 позволяет представить эти возмущения в следующем виде:

$$\delta\varepsilon_{33}(x,z) = 2n_e^4 P_S^2 R_{33}\frac{\omega_0}{\Lambda_x}\sum_{m=1}^{\infty}\frac{m\pi^2\omega_0/\Lambda_x}{\mathrm{sh}(m\pi^2\omega_0/\Lambda_x)}C_m(z)\exp\left(im\frac{2\pi}{\Lambda_x}x\right)+c.c., \quad (2)$$

с коэффициентами $C_m(z)$, определяемыми составляющими непрерывного углового спектра для каждой дискретной пространственной гармоники с номером m:

$$C_m(z) = (i)^m\exp\left[im\frac{2\pi}{\Lambda_x}\mathrm{tg}\,\alpha(z_0-z)\right]+(-i)^m\exp\left[-im\frac{2\pi}{\Lambda_x}\mathrm{tg}\,\alpha(z_0-z)\right]. \quad (3)$$

Как видно из соотношений (2) и (3), амплитуды дискретных гармоник возмущений компоненты диэлектрического тензора для РДС с наклонными стенками, определяющие эффективность дифракции Брэгга узкого вдоль полярной оси Z зондирующего лазерного пучка, характеризуются гармонической зависимостью от координаты z, что было обнаружено ранее экспериментально в работе [1]. Влияние конечной ширины доменной стенки $2\omega_0$ на распределение амплитуд дискретных пространственных гармоник с номерами $m = 1, 2, 3. \ldots$ учитывается в формуле (2) коэффициентом $\left(m\pi^2\omega_0/\Lambda_x\right)\Big/\mathrm{sh}(m\pi^2\omega_0/\Lambda_x)$.

Работа выполнена в рамках Госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на 2023 - 2025 годы (задание FEWM-2023-0012).

Список литературы

1. Савченков Е.Н. и др. // XIII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сбор. науч. тр. М.: НИЯУ МИФИ, 2024. С. 479-480.

2. Савченков Е.Н. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2019.. Т. 110. С. 178.

Л.А. БОБРЕВА, Р.А. ТИТОВ, М.В. СМИРНОВ, И.В. БИРЮКОВА, С.М. МАСЛОБОЕВА, О.В. ПАЛАТНИКОВА, А.Ю. ПЯТЫШЕВ[1], Н.В. СИДОРОВ, М.Н. ПАЛАТНИКОВ

Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева Кольского научного центра РАН, Апатиты, Мурманская обл.
[1]Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ $LiNbO_3$:Zn:Er РАЗНОГО ГЕНЕЗИСА

Используя комплексный подход методами оптической микроскопии, фотолюминесцентного анализа, ИК-спектроскопии поглощения в области валентных колебаний водородных связей и спектроскопии КРС выполнены сравнительные исследования тонких особенностей структуры, анализ фотолюминесцентных свойств и концентрации OH^--групп кристаллов двойного легирования $LiNbO_3$:Zn:Er, полученных из шихты разного генезиса.

L.A. BOBREVA, R.A. TITOV, M.V. SMIRNOV, I.V. BIRYUKOVA, S.M. MASLOBOEVA, O.V. PALATNIKOVA, A.Yu. PYATYSHEV[1], N.V. SIDOROV, M.N. PALATNIKOV

I.V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Material of Kola Science Center of the RAS, Apatity, Murmansk region
[1]Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

COMPARATIVE STUDIES OF $LINBO_3$:Zn:Er CRYSTALS OF DIFFERENT GENESIS

Using a comprehensive approach using optical microscopy, photoluminescence analysis, IR absorption spectroscopy in the region of hydrogen bond stretching vibrations and Raman spectroscopy, comparative studies of fine structural features, analysis of photoluminescence properties and concentration of OH^--groups of double-doped $LiNbO_3$:Zn:Er crystals obtained from batches of different genesis were performed.

Для формирования оптического излучения в требуемом спектральном диапазоне кристаллы ниобата лития ($LiNbO_3$) легируют центрами свечения – редкоземельными элементами (Re). Легирование двухвалентными «нефоторефрактивными» элементами (Mg^{2+}, Zn^{2+}) позволяет повысить устойчивость кристаллов $LiNbO_3$ к повреждению лазерным излучением. При двойном легировании кристаллов $LiNbO_3$

нефоторефрактивной примесью и редкоземельным элементом происходит кардинальное изменение состояния их дефектной структуры. При этом редкоземельный элемент можно поместить в определенные позиции в катионной подрешётке так, чтобы интенсивность свечения была максимальной. Таким образом можно также регулировать интенсивность люминесценции редкоземельных ионов в кристалле $LiNbO_3$. При этом особенности технологий легирования оказывают существенное влияние на состояние дефектности и люминесцентные характеристики кристалла.

В связи с этим актуальным является исследование тонких особенностей структуры и состояния дефектности катионной подрешётки кристаллов $LiNbO_3$:Zn:Er, полученных по разным технологиям легирования. В данной работе приведены результаты исследований кристаллов двойного легирования $LiNbO_3$:Zn (4.02 мол.%):Er (0.53 мол.%) выращенных методом Чохральского с использованием технологии прямого легирования расплава и монокристалла $LiNbO_3$:Zn (3.82 мол.%):Er (0.75 мол.%), полученного с использованием технологии гомогенного легирования.

Методом оптической микроскопии установлено, что кристалл $LiNbO_3$:Zn (4.02 мол.%):Er (0.53 мол.%) имеет более высокое оптическое качество. В кристалле $LiNbO_3$:Zn (3.82 мол.%):Er (0.75 мол.%) наблюдается девиация оптической плотности. По спектрам ИК-поглощения в области валентных колебаний OH^--групп показано, что появление полос поглощения с частотами 3483 и 3492 $см^{-1}$ связано с нарушением стехиометрии в кристалле (величины Li/Nb) и с образованием двух видов комплексных дефектов V_{Li}-OH и Zn_{Nb}-OH. Анализ спектров КРС позволил оценить степень упорядочения катионной подрешётки исследуемых кристаллов. Показано, что кристалл $LiNbO_3$:Zn (4.02 мол.%):Er (0.53 мол.%), полученный по технологии прямого легирования, обладает более высоким упорядочением структурных единиц катионной подрешётки. Установлено, что для исследованных кристаллов фотолюминесценция в видимой области обусловлена излучательными переходами иона Er^{3+} без проявления собственной люминесценции матрицы. В кристалле $LiNbO_3$:Zn (4.02 мол.%):Er (0.53 мол.%) интенсивность люминесценции и концентрация OH^--групп выше относительно кристалла $LiNbO_3$:Zn (3.82 мол.%):Er (0.75 мол.%). Таким образом, концентрация OH^--групп в кристалле регулирует трансфер энергии от матрицы кристалла к ионам Er^{3+}.

УДК 535(06)+004(06)

С.В. АВЕРИН, В.А. ЛУЗАНОВ, В.А. ЖИТОВ,
Л.Ю. ЗАХАРОВ, В.М. КОТОВ
Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

ОПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР NiO/$LiNbO_3$

Приведены результаты экспериментальных исследований оптических и электрических свойств структур на основе оксида никеля, выращенного на подложках $LiNbO_3$ Найдены оптимальные условия напыления плёнок NiO для достижения их высокого кристаллического совершенства. При этом полуширина кривой качания плёнки для плоскости (111) составила 0.04^0. Установлено, что при освещении со стороны подложки на структуре NiO/$LiNbO_3$ можно реализовать узкополосный «солнечно слепой» фотодетектор.

S.V. AVERIN, V.A. LUZANOV, V.A. ZHITOV,
L.Yu. ZAKHAROV, V.M. KOTOV
Fryazino branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS

OPTICAL AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF SEMICONDUCTOR STRUCTURES NiO/$LiNbO_3$

We present the results of experimental study of optical and electrical properties of NiO films grown on $LiNbO_3$ substrates. Optimum conditions for deposition of NiO to achieve high crystalline perfection were found. The half-width of the film rocking curve for the (111) plane was 0.04^0. It was found that, when illuminated from the substrate, a narrow-band "solar-blind" photodetector can be realized in the NiO/$LiNbO_3$ structure.

Оксид никеля – широкозонный полупроводник p-типа – является перспективным материалом для многих практических применений в УФ-части спектра [1]. Было установлено, что подложки, на которых осаждается NiO, в значительной степени изменяют оптические свойства, в частности, ширину запрещённой зоны NiO [1]. Мы впервые приводим результаты экспериментальных исследований оптических и электрических свойств структур на основе NiO, выращенного на подложках $LiNbO_3$ методом магнетронного распыления. При осаждении плёнок варьировались ток разряда, компоненты реакционной смеси Ar-O_2 и её давление. Толщины осаждённых плёнок в экспериментах были в диапазоне 50 … 500 нм. Найдены оптимальные условия напыления

плёнок NiO для достижения их высокого кристаллического совершенства. В частности, установлено, что снижение тока разряда с 200 до 100 mA позволяет реализовать равновесный процесс осаждения NiO и получать кристаллически более совершенные плёнки. При этом полуширина кривой качания плёнки (рис. 1) для плоскости (111) составила 0.04 ^{0} при соотношении реакционной смеси Ar – 50 %, O_2 – 50 %.

Оптические свойства изготовленных структур исследовались (рис. 2) в диапазоне длин волн 250 … 800 нм. Пропускание плёнок NiO в диапазоне длин волн 450 - 800 нм составляет 60 %, а край оптического поглощения NiO находится на 340 нм. Перед осаждением NiO были исследованы оптические свойства самих подложек $LiNbO_3$. Подложка имеет край оптического поглощения на длине волны 310 нм и эффективно пропускает свет на более длинных волнах. Следовательно, при освещении со стороны подложки на структуре NiO/$LiNbO_3$ можно реализовать узкополосный фотодетектор, отклик которого будет ограничен диапазоном волн 310 … 340 нм. Такой полосовой детектор является «солнечно слепым» и позволяет фиксировать биологически опасное излучение Солнца.

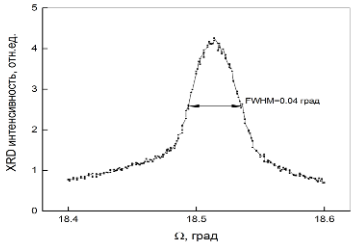


Рис. 1. Кривая качания для образца с толщиной эпитаксиального слоя NiO 300 нм

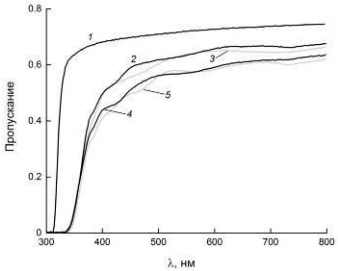


Рис. 2. Спектры пропускания исследуемых образцов: подложка $LiNbO_3$ (1), структуры NiO/$LiNbO_3$ с слоем NiO разной толщины: 300 нм (2), 20 нм (3), 380 нм (4), 525 нм (5)

На выращенных плёнках NiO изготовлены диодные структуры в виде встречно-штыревых Шоттки барьерных контактов. Низкие темновые токи диодов подтверждают присутствие барьера Шоттки на интерфейсе Ni/NiO. Плёнки NiO, выращенные на подложках $LiNbO_3$ перспективны для создания на их основе узкополосных детекторов излучения УФ-части спектра.

Работа выполнена в рамках Госзадания ФИРЭ РАН.

Список литературы

1. Manjunatha K.N., Paul Sh. // Applied Surface Science. 2015. V. 352. P. 10.

Ф.Н. ХАЙРУЛЛИН, И.Н. КОРЕНЬКОВ, В.А. ИВАСЕНКО,
С.С. БУЛАТОВ, А.А. КОЛМАКОВ, Р.И. АНИСИМОВ, Э.В. КОМОВ
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

АГРЕГИРОВАНИЕ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ПЛАСТИНЫ $LiNbO_3$:Cu ПОЛЯМИ ФОТОРЕФРАКТИВНЫХ ГОЛОГРАММ

Представлены результаты экспериментального исследования агрегации наночастиц Al_2O_3 под действием электрических полей фоторефрактивных голограмм, сформированных на поверхности пластины *X*-среза $LiNbO_3$:Cu, полученной диффузионным легированием.

F.N. KHAIRULLIN, I.N. KORENKOV, V.A. IVASENKO,
S.S. BULATOV, A.A. KOLMAKOV, R.I. ANISIMOV, E.V. KOMOV
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

AGGREGATION OF ALUMINUM OXIDE NANOPARTICLES ON THE SURFACE OF A $LiNbO_3$:Cu PLATE BY THE FIELDS OF PHOTOREFRACTIVE HOLOGRAMS

The results of an experimental study on the aggregation of Al_2O_3 nanoparticles under the influence of electric fields of photorefractive holograms formed on the surface of an *X*-cut $LiNbO_3$:Cu plate obtained by diffusion doping are presented.

Кристаллы ниобата лития, обладающие уникальными нелинейными, пьезоэлектрическими и фоторефрактивными свойствами [1], продолжают привлекать внимание исследователей благодаря возможности модификации их характеристик для применения в различных приложениях [1 - 3]. Одним из эффективных методов изменения фоторефрактивных свойств $LiNbO_3$ является легирование ионами железа и меди, что значительно усиливает его фотовольтаические параметры [3 - 4]. При формировании динамических голограмм в таких структурах возникают электрические поля высокой напряжённости, которые используются для управления микро- и нанообъектами [3 - 5].

В настоящем сообщении описаны эксперименты по агрегации наночастиц Al_2O_3 со средним размером 50 нм электрическими полями фоторефрактивных голограмм, сформированных в диффузионно-

легированной структуре $LiNbO_3$:Cu, где максимальные концентрации ионов Cu^+ и Cu^{2+} локализованы вблизи *X*-граней.

На пластину конгруэнтного ниобата лития с размерами $2 \times 5 \times 15$ мм^3 по осям *X*, *Y* и *Z* соответственно, на обе *X*-плоскости были напылены медные плёнки с толщиной 800 нм. Далее проводилась диффузия в атмосфере аргона при температуре 700 °C в течение 12 часов. Для формирования в полученной структуре $LiNbO_3$:Cu фоторефрактивной голограммы с пространственным периодом $\Lambda = 10$ мкм вдоль оси *Z* использовалась попутная схема двухпучковой записи, при которой интерференционная картина характеризовалась средней интенсивностью лазерного излучения ($\lambda = 532$ нм) $I_0 = 0{,}3$ Вт/см^2 и контрастом $m = 0{,}98$.

Время воздействия записывающих пучков на образец составляло 180 с, после чего кристалл помещался на 300 с в колбу с суспензией, содержащей наночастицы Al_2O_3 с суммарной массой от 3 до 5 мг, равномерно распределенные в медицинском вазелиновом масле объёмом 30 мл. Для регистрации эффекта агрегации, иллюстрируемого на рис. 1, использовался микроскоп МБС-10 с увеличением $56^{\times}$.

Как видно из рис. 1, используемый метод нанесения наночастиц из суспензии позволяет проследить распределение действующих на них сил при пространственном периоде голограммы $\Lambda = 10$ мкм.

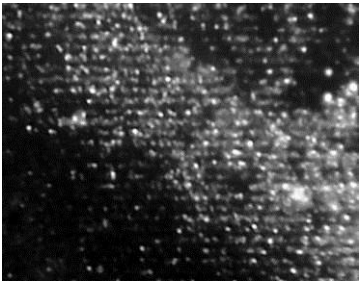


Рис. 1. Фрагмент микрофотографии поверхности *X*-грани образца $LiNbO_3$:Cu с агрегированными наночастицами Al_2O_3

Список литературы

1. Toney J.E. Lithium niobate photonics. Boston, London: Artech House, 2015.

2. Герасименко Н.Д., и др. // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 4. С. 3-11.

3. Tsarukyan L, Badalyan A., Drampyan R. //Optical Memory and Neural Networks. 2024. V. 32. Suppl. 3. P. S369-S383.

4. Анисимов Р.И. и др. // Оптика и спектроскопия. 2023. Т 31. № 10. С. 1365-1373.

5. Мамбетова К.М. и др. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2019. Т. 62. № 4. С. 89-93.

В.В. ДАВЫДОВСКАЯ, В.Н. НАВНЫКО, А.В. ФЕДОРОВА
Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина, Беларусь

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДВУМЕРНЫХ ЛИНЕЙНО-ПОЛЯРИЗОВАННЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ В ФОТОРЕФРАКТИВНОМ КРИСТАЛЛЕ SBN

В работе выполнено теоретическое моделирование распространения двумерного линейно-поляризованного светового пучка в фоторефрактивном кристалле SBN, установлены особенности изменения поляризационных составляющих суммарной интенсивности пучка.

V.V. DAVYDOUSKAYA, V.N. NAUNYKA, A.V. FEDOROVA
Mozyr State Pedagogical University named after I.P. Shamyakin, Belarus

FEATURES OF PROPAGATION OF TWO-DIMENSIONAL LINEARLY POLARIZED LIGHT BEAMS IN AN SBN PHOTOREFRACTIVE CRYSTAL

In this work, theoretical modeling of the propagation of a two-dimensional linearly polarized light beam in a photorefractive SBN crystal is performed, and the features of the change in the polarization components of the total beam intensity are established.

В ряде работ (например в [1]) отмечено, что интенсивность светового поля в области распространения светового пучка в фоторефрактивном кристалле разделяется на две поперечные поляризационные составляющие. В случае, если внешнее электрическое поле $\vec{E}_0$ и ось *ox* – направлены вдоль кристаллографической оси *c*, а пучок на входе в кристалл имеет *x*- или *y*-поляризацию, поперечная составляющая имеет форму «четырёхлистного лепестка» (например [2]). При численном моделировании основные параметры кристалла SBN были взяты из [3], радиус перетяжки гауссова светового пучка $r_0 = 12$ мкм, толщина фоторефрактивного кристалла $d = 10$ мм, напряжённость внешнего электрического поля $E_0 = 1.2$ кВ/см.

Для двумерного гауссова светового пучка с входным азимутом поляризации $\psi = 0°$ (*x*-поляризация) максимальная фокусировка I = 3.97 отн. ед. наблюдается (рис. 1) при значениях ориентационного угла

$\theta \approx 115$ ° и $\theta \approx 245$ °, а для $\psi = 90$ ° (y-поляризация) светового пучка при значениях ориентационного угла $\theta \approx 82$ ° и $\theta \approx 278$ °, I = 1.63 отн. ед.

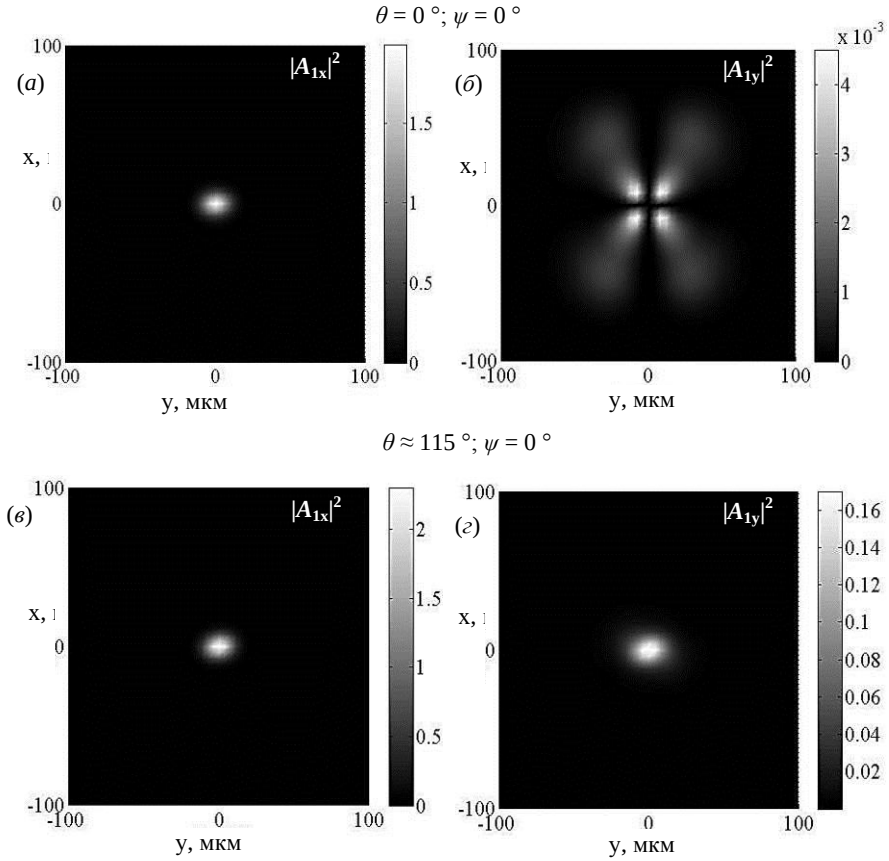


Рис. 1. Составляющие общей суммарной интенсивности x-поляризованного на входе в кристалл двумерного гауссова светового пучка: внешнее поле $\vec{E}_0$ направлено параллельно оптической оси кристалла (*а*. *б*); внешнее поле $\vec{E}_0$ направлено под углом θ к оптической оси кристалла (*в*, *г*)

Список литературы

1. Conry J. // J. Opt. Soc. Am. A. 2012. V. 29. P. 579-584.

2. Safioui J. // Opt. Comm. 2015. V. 355. P.382-390.

3. Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. СПб.: Наука, 1992.

УДК 535(06)+004(06)

М.Ф. УМАРОВ, А.К. КАЮМЗОДА[1]
Вологодский государственный университет
[1]Худжандский государственный университет им. акад. Б. Гафурова, Таджикистан

ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ $Pr_3Sb_5O_{12}$ И $Nb_3Sb_5O_{12}$

В работе предложен неразрушающий метод контроля качества пьезоэлектрических кристаллов, основанный на измерении степени деполяризации квазиупругого рассеяния. Метод позволяет с 5 %-ной точностью определять добротность в любой точке пьезоэлектрического блока, ограниченной только размерами пятна сфокусированного лазерного луча. Это даёт возможность отказаться от изготовления пьезоэлементов, механической обработки, полировки кристаллических блоков, нагрева образцов, а также повысить выход пьезорезонаторов, микрогенераторов, фильтров.

M.F. UMAROV, A.K. KAYUMZODA[1]
Vologda State University
[1]Khujand State University named after Academician B. Gafurov, Tajikistan

OPTICAL QUALITY CONTROL METHOD FOR PIEZOELECTRIC CRYSTALS $Pr_3Sb_5O_{12}$ AND $Nb_3Sb_5O_{12}$

The paper proposes a non-destructive method for quality control of piezoelectric crystals based on measuring the degree of depolarization of quasi-elastic scattering. The method allows determining with 5 % accuracy the quality factor at any point of the piezoelectric block, limited only by the size of the spot of the focused laser beam. This makes it possible to abandon the manufacture of piezoelectric elements, mechanical processing, polishing of crystal blocks, heating of samples, as well as increase the output of piezoresonators, microgenerators, filters.

Целью настоящей работы является определение величины добротности пьезоэлектрических кристаллов оптическим методом. В основе метода лежит физический принцип, заключающийся в том, что интенсивность рассеянного в кристаллах света на частотах, близких к падающему излучению, аддитивно содержит вклады от рассеяния на флуктуациях плотности – рэлеевское рассеяние, рассеяние на тепловых флуктуациях (мандельштам-бриллюэновское рассеяние) и рассеяние на дефектах, примесях, дислокациях, несовершенствах решётки – упругое

рассеяние. Каждый из этих вкладов может повлиять на степень деполяризации рассеянного света. При рассеянии света под углом 90 ° степень деполяризации реального кристалла будет определяться анизотропией его поляризуемости при рассматриваемой симметрии и вкладом в анизотропию тензора поляризуемости от дефектов несовершенства структуры.

Найдем изменение степени деполяризации, связанное с дефектами кристаллической решётки, для случая пьезоэлектрических кристаллов $Pr_3Sb_5O_{12}$ и $Nb_3Sb_5O_{12}$ с группой симметрии $I43m$.

Нами были проведены измерения для кристаллов $Pr_3Sb_5O_{12}$ с предварительно измеренными значениями добротности Q = 0,05; 0,11; 0,92; 1,12; 1,45 × 10^6. Аналогичные измерения были выполнены также для кристаллов $Nb_3Sb_5O_{12}$ со следующими известными добротностями; Q = 0,06; 0,09; 0,16; 0,33; 0,89; 1,68 × 10^3. На рис. 1 приведена зависимость степени деполяризации ρ от величины добротности Q пьезокристаллов $Pr_3Sb_5O_{12}$ и $Nb_3Sb_5O_{12}$.

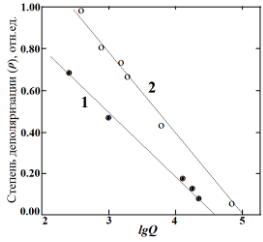


Рис. 1. Зависимость степени деполяризации (ρ) квазиупругого рассеяния света от добротности образцов (Q) кристаллов $Pr_3Sb_5O_{12}$ (1) и $Nb_3Sb_5O_{12}$ (2)

Как видно из рис. 1, степень деполяризации квазиупругого рассеяния действительно коррелирует с величинами добротности пьезоэлектрических кристаллов и зависимость в исследованном диапазоне добротностей близка к экспоненциальной. Были также проведены такие измерения для нескольких образцов $Pr_3Sb_5O_{12}$ с неизвестными добротностями, которая была оценена по полученным результатам. Последующие прямые измерения, выполненные методом пьезорезонанса в АОО «Фонон» (г. Москва), также подтвердили, что точность оптического метода не хуже 5 %. Следует отметить, что оптический метод для проведения измерений не требует изготовления пьезорезонатора и позволяет определять добротность любой точки пьезокристалла, ограниченной только размерами пятна сфокусированного лазерного луча.

Н.Н. КУЗЬМИН, В.В. МАЛЬЦЕВ[1], И.А. МОРОЗОВ[2]
Институт спектроскопии РАН, Москва, Троицк
[1]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
[2]Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва

РАСТВОР-РАСПЛАВНАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РЕДКОЗЕМЕЛЬНОХРОМОВЫХ ОРТОБОРАТОВ

В работе приведены результаты экспериментов по спонтанной кристаллизации редкоземельнохромовых ортоборатов методом раствор-расплавной кристаллизации и зарегистрированы спектры поглощения этих соединений в дальнем инфракрасном диапазоне. Исходя из этих данных определены условия выращивания кристаллов и их политипные модификации.

N.N. KUZMIN, V.V. MALTSEV[1], I.A. MOROZOV[2]
Institute of Spectroscopy of the RAS, Troitsk
[1]Lomonosov Moscow State University
[2]Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the RAS, Moscow

FLUX GROWTH AND OPTICAL PROPERTIES OF THE RARE-EARTH CHROMIUM ORTHOBORATES

The paper presents the results of experiments on flux growth of the rare-earth chromium orthoborates and the absorption spectra of these compounds in the far infrared region. The conditions of crystal growth and polytypic modifications have been studied.

Интерес к изучению боратов, в частности, связан с тем, что они обладают большим разнообразием кристаллических структур [1] и являются перспективными функциональными материалами [2]. На данный момент они нашли широкое применение в качестве нелинейных оптических материалов [3].

Двойные бораты $REEM_3(BO_3)_4$ (M = Al, Sc, Cr, Fe, Ga) изоструктурны минералу хантиту и относятся к магнитоэлектрическим соединениям. Среди представителей этого семейства особый интерес вызывают представители с двумя магнитными подсистемами, которые образованы ионами 4*f*- и 3*d*-элементов. Они обуславливают необычные магнитные

свойства, имеющиеся у боратов железа и редкоземельных элементов этого семейства [4]. Бораты хрома и редкоземельных элементов изучены в значительно меньшей степени. В литературе имеются краткие сообщения об условиях роста кристаллов $REECr_3(BO_3)_4$, их структурных и магнитных свойствах [5, 6]. Первоначально полагалось, что кристаллическая структура этих соединений имеет пространственную группу (пр. гр.) *R*32 [7], однако в последующих исследованиях была обнаружена вторая структурная модификация с пр. гр. *C*2/*c* [8]. Обе эти модификации кристаллизуются совместно. Этот факт усложняет интерпретацию получаемых экспериментальных данных. В связи с этим существует необходимость в выращивании кристаллов, содержащих только модификацию с пр. гр. *R*32.

Целью работы является экспериментальное изучение условий кристаллизации ортоборатов $LnCr_3(BO_3)_4$ (*Ln* = Y, La, Pr, Nd, Sm - Er) из высокотемпературного раствора-расплава на основе $K_2Mo_3O_{10}$ и определение кристаллизующихся структурных модификаций. Представлены результаты исследования псевдобинарных систем $LnCr_3(BO_3)_4$ - $K_2Mo_3O_{10}$. В них определены зоны монофазной кристаллизации $LnCr_3(BO_3)_4$ и Cr_2O_3. Первая из них ограничена 30 - 70 мас. % $K_2Mo_3O_{10}$, в зависимости от редкоземельного элемента. Для полученных кристаллов зарегистрированы спектры поглощения в дальнем инфракрасном диапазоне. По соотношению интенсивностей фононных мод, отвечающим колебаниям редкоземельных ионов, определено возрастание доли модификации с пр. гр. *R*32 с увеличением доли $K_2Mo_3O_{10}$ в исходной шихте.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ № FFUU-2024-0004.

Список литературы

1. Mutailipu M., et al. // Chemical Reviews. 2020. V. 121 (3). P. 1130.
2. Chen C., et al. // Nature. 1995. V. 373. P. 322.
3. Mutailipu M., et al. // Accounts of Chemical Research. 2019. V. 52 (3). P. 791.
4. Кадомцева А.М. и др. // Физика низких температур. 2010. Т. 36 (6). С. 640.
5. Кузьмин Н.Н. и др. // Неорганические материалы. 2020. V. 56 (8). P. 873.
6. Bludov A., et al. // J. Magnetism and Magnetic Materials. 2020. V. 512. P. 167010.
7. Ballman A.A. // American Mineralogist. 1962. V. 47 (11-12). P. 1380.
8. Куражковская В.С. и др. // Журнал структурной химии. 2008. Т. 49 (6). С. 1074.

УДК 535(06)+004(06)

М.Ф. УМАРОВ, К.С. КОЗИЕВ[1]
Вологодский государственный университет
[1]Горно-металлургический институт Таджикистана, Бустон, Таджикистан

ПРИРОДА ЦЕНТРАЛЬНОГО ПИКА В КВАРЦЕ

Проведены исследования низкочастотных колебаний кристаллов кварца при фиксированных частотах в окрестности точки структурного фазового перехода, показали, что критическая опалесценция не связана с конденсацией мягкой моды, и объясняется образованием статических неоднородностей, которые приводят к возрастанию интенсивности центрального несмещённого пика. Интенсивность этого пика существенно отличается у различных образцов кварца и сильно возрастает при наличии дефектов.

M.F. UMAROV, K.S. KOZIEV[1]
Vologda State University
[1]Mining and Metallurgical Institute of Tajikistan, Buston, Tajikistan

THE NATURE OF THE CENTRAL PEAK IN QUARTZ

Studies of low-frequency vibrations of quartz crystals at fixed frequencies in the vicinity of the point of structural phase transition have been carried out, they have shown that critical opalescence is not associated with condensation of the soft mode, and is explained by the formation of static inhomogeneity that lead to an increase in the intensity of the central unbiased peak. The intensity of this peak differs significantly in different quartz samples and increases strongly in the presence of defects.

При изучении рассеяния света вблизи точки $\alpha \rightarrow \beta$ перехода в кварце нами была использована методика, основанная на анализе спектральной интенсивности комбинационного рассеяния света (КРС) при фиксированных частотах рассеяния и непрерывном изменении температуры образца, включая точку структурного фазового перехода.

На рис. 1 приведена зависимость спектральной интенсивности КРС $J(\Omega, T)$ кварца от температуры при фиксированной частоте $\Omega = 20$ см$^{-1}$. Как видно, при геометрии рассеяния $X(ZZ)Y$ вблизи точки перехода ($T_c = 846$ К) обнаруживается два максимума. Первый максимум наблюдается в очень узкой температурной окрестности точки фазового перехода. Интенсивность этого максимума существенно отличается для различного образцов кварца. Второй максимум наблюдается при температуре ниже T_c и характеризуется значительно большей температурной шириной; его величина слабо связана с качеством образца.

С целью более подробного изучения свойств первого резкого максимума в ближайшей окрестности точки структурного фазового перехода мы провели его дополнительные исследования с использованием градиентной кюветы. Исследуемый образец помещался между хладопроводом и нагревательной пластиной. Лазерный луч от аргонового лазера проходил через помещённый в градиентную кювету кристалл кварца. Холодная сторона кристалла могла охлаждаться до 373 К, горячая – нагреваться до 870 К. Путём перемещения кюветы относительно луча можно было зафиксировать точку кристалла, соответствующую температуре структурного фазового перехода.

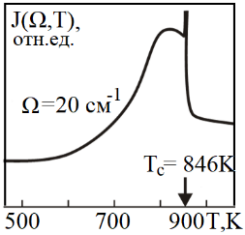


Рис. 1. Зависимость спектральной интенсивности $J(\Omega, T)$ от температуры в кварце вблизи фазового перехода

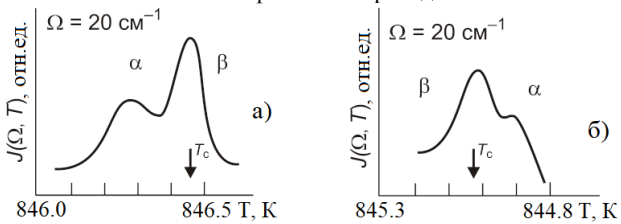


Рис. 2. Зависимость интенсивности рассеянного света от температуры в фиксированной точке кристалла кварца: нагревание (а), охлаждение (б)

Как видно из этого рисунка, при температуре $T_c = 846$ К при нагревании (рис. 2а) происходит структурный $\alpha \rightarrow \beta$ переход. При охлаждении (рис. 2б) наблюдается обратный $\beta \rightarrow \alpha$ переход; из-за гистерезисных эффектов переход происходит при температуре $T_c = 845{,}1$ К. Величина интенсивности центрального пика при $\alpha \rightarrow \beta$ превращении больше, чем при обратном переходе. Нами были исследованы монокристаллы искусственного и естественного кварца с различной степенью дефектности. Установлено, что интенсивность центрального пика существенно отличается у различных образцов кварца и сильно возрастает при увеличении концентрации дефектов.

Т.Г. ГОЛОВИНА, А.Ф. КОНСТАНТИНОВА, Е.В. ЗАБЕЛИНА[1],
Н.С. КОЗЛОВА[1], В.М. КАСИМОВА[1]
Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова НИЦ «Курчатовский институт», Москва
[1]*Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва*

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ СПЕКТРОВ ПРОПУСКАНИЯ ГИРОТРОПНЫХ ОДНООСНЫХ КРИСТАЛЛОВ Z- и X-СРЕЗОВ

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование влияния несовершенства поляризатора, анализатора и фотоэлектронного умножителя на результаты измерений спектров пропускания кристаллов катангасита $Ca_3TaGa_3Si_2O_{14}$, вырезанных перпендикулярно и параллельно оптической оси.

T.G. GOLOVINA, A.F. KONSTANTINOVA, E.V. ZABELINA[1],
N.S. KOZLOVA[1], V.M. KASIMOVA[1]
Shubnikov Institute of Crystallography of NRC «Kurchatov Institute», Moscow
[1]*National University of Science and Technology MISIS, Moscow*

INTERPRETATION OF MEASUREMENT RESULTS OF TRANSMISSION SPECTRA OF GYROTROPIC UNIAXIAL CRYSTALS OF Z- AND X-SECTIONS

A theoretical and experimental study of the effect of the imperfection of the polarizer, analyzer and photomultiplier tube on the measurement results of the transmission spectra of $Ca_3TaGa_3Si_2O_{14}$ catangasite crystals cut perpendicular and parallel to the optical axis has been carried out.

Для правильной интерпретации результатов спектрофотометрических измерений необходимо учитывать погрешности, связанные с несовершенством оптических элементов прибора [1]. Для измерений выбраны кристаллы катангасита $Ca_3TaGa_3Si_2O_{14}$, выращенные в АО “Фомос–Материалы” [2]. Образцы вырезаны перпендикулярно (*z*-срез) и параллельно (*x*-срез) к оптической оси. Измерения спектров пропускания кристаллов проведены в диапазоне λ = 200 - 2500 нм на спектрофотометре Cary-5000 с универсальной измерительной приставкой UMA в неполяризованном и поляризованном свете. На полученных спектрах пропускания (рис. 1) имеется «скачок» при λ = 1050 нм, связанный со сменой канала в детекторе прибора.

Проведён расчёт интенсивностей прошедшего света методом матриц Мюллера [1, 3]. Показано, что основную погрешность вносит неидеальность фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). Для *p*-поляризации падающего света при измерении без анализатора для *z*- (I_{pz}) и *x*-среза (I_{px}):
$I_{pz} = (I_0 e^{-\zeta}/2)[(1 + f_2/f_1)\mathrm{ch}\delta + (1 - f_2/f_1)\cos 2\rho d]$,
$I_{px} = (I_0 e^{-\zeta}/2)[(1 + f_2/f_1)\mathrm{ch}\delta + 2\cos 2\varphi \mathrm{sh}\delta + (1 - f_2/f_1)(\cos 2\varphi^2 \mathrm{ch}\delta + \cos\Delta \sin 2\varphi^2)]$.
Для *s*-поляризации индексы 1 и 2 меняются местами. Здесь ρ – вращение плоскости поляризации света, $\Delta = 2\pi d(n_2 - n_1)/\lambda$, $\delta = 2\pi d(\kappa_2 - \kappa_1)/\lambda$, n_1, n_2 – показатели преломления, κ_1, κ_2 – коэффициенты поглощения, φ – угол между оптической осью кристалла и направлением наибольшего пропускания поляризатора, f_1 и f_2 характеризуют регистрацию излучения *p*- и *s*-поляризации, для идеального ФЭУ $f_1 = f_2$. При $f_1 \neq f_2$ ФЭУ играет роль неидеального анализатора, приводящего к появлению осцилляций на спектрах пропускания света (рис. 1), наиболее выраженных на образце *x*-среза при φ = 45 °. Частота осцилляций для образца *z*-среза связана с величиной ρ*d* (рис. 1а), для *x*-среза – с двупреломлением $n_2 - n_1$ (рис. 1б).

При измерениях с поляризатором и анализатором для точного расчёта величины ρ необходимы спектры пропускания, измеренные при углах между поляризатором и анализатором ± 45 °.

С помощью полученных результатов можно определить, на какие величины нужно обращать внимание, чтобы получать правильные результаты для разных кристаллов и на любом спектрофотометре.

Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» и при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания ВУЗам FSME-2023-0003.

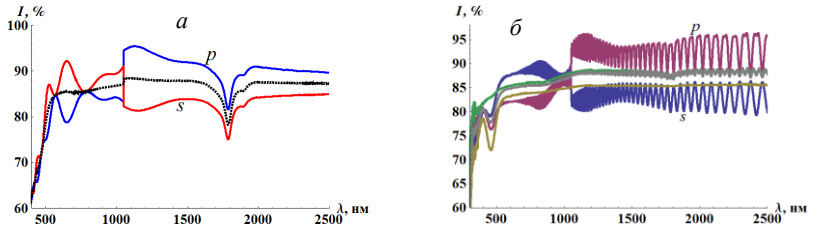


Рис. 1. Спектры пропускания кристалла $Ca_3TaGa_3Si_2O_{14}$ при *p*- и *s*-поляризациях: образец *z*-среза, *d* = 10 мм (*а*), образец *x*-среза, *d* = 1 мм, φ = 0, 45 ° (*б*)

Список литературы

1. Шерклифф У. Поляризованный свет. М.: Мир, 1965.
2. https://newpiezo.com/
3. Шамбуров В.А., Евдищенко Е.А., Вислобоков А.И. // Кристаллография. 1988. Т. 33. С. 554.

УДК 535(06)+004(06)

В.Н. НАВНЫКО, Г.В. КУЛАК, Д.С. БЛОЦКАЯ,
М.А. АМАНОВА[1], С.М. ШАНДАРОВ[2]
Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина, Беларусь
[1]*Институт телекоммуникаций и информатики Туркменистана, Ашхабад*
[2]*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ОБРАЩЕНИЯ ВОЛНОВОГО ФРОНТА В КРИСТАЛЛЕ GaAs

Исследована зависимость оптимизированного по азимуту поляризации световых волн и ориентационному углу коэффициента отражения при четырёхволновом взаимодействии от пространственной ориентации кристалла GaAs. Найдены симметрично эквивалентные кристаллографические направления, вдоль которых коэффициент отражения достигает максимального значения.

V.N. NAUNYKA, G.V. KULAK, D.S. BLOTSKAYA,
M.A. AMANOVA[1], S.M. SHANDAROV[2]
Mozyr State Pedagogical University named after I.P. Shamyakin, Belarus
[1]*Institute of Telecommunications and Informatics of Turkmenistan, Ashgabat*
[2]*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*

DETERMINATION OF OPTIMAL CONDITIONS FOR WAVEFRONT PHASE CONJUGATION IN GaAs CRYSTAL

The dependence of reflection coefficient at four-wave mixing optimized by azimuth of light wave polarization and orientation angle on the spatial orientation of GaAs crystal is investigated. Symmetrically equivalent crystallographic directions along which the reflection coefficient reaches its maximum value are found.

Физические закономерности четырёхволнового взаимодействия (ЧВВ) в кубических фоторефрактивных кристаллах используются при создании лазеров на динамических решётках [1]. При этом эффективность дифракции во многом определяется пространственной анизотропией электрооптического, фотоупругого и обратного пьезоэлектрического эффектов кристалла [2]. В работе приведены результаты изучения зависимости коэффициента отражения при ЧВВ от пространственной ориентации фоторефрактивного кристалла с параметрами, соответствующими кристаллу GaAs. На рис. 1 в сферической системе координат представлен фрагмент указательной поверхности, построенной для иллюстрации зависимости оптимизированных значений

коэффициента отражения R^{opt} при встречном ЧВВ от пространственной ориентации кристалла. В качестве координатных осей выбраны кристаллографические оси <100> кристалла, а для большей наглядности дополнительно представлены направления [110] и [111]. На осях тёмными окружностями отмечены значения R^{opt}, равные 0.02. Геометрия ЧВВ и уравнения связанных волн, которые использовались при нахождении интенсивности обращённого светового пучка, описаны в [3]. Для каждой точки на поверхности параметр R^{opt} выбирался как наибольший коэффициент отражения, полученный при рассмотрении физически различимых значений линейной поляризации пучков и ориентационного угла поворота кристалла. Рассматриваемой поверхности присущи шесть экстремальных направлений, вдоль которых параметр R^{opt} достигает максимальной величины ($R^{max} = R^{opt}$). При оптимальных условиях эффективность дифракции для направления [111] близка к максимальной, поскольку значения R^{opt} и R^{max} являются сравнимыми. В направлении [110] значения R^{opt} существенно уменьшаются относительно R^{max}. Вдоль осей вида <100> параметр R^{opt} принимает близкие к минимально возможным значения. На рис. 2 поверхность представлена в прямоугольной системе координат, на которой по оси абсцисс отложен азимутальный угол α, а по оси ординат – полярный угол β. Точки поверхности, которым соответствуют значения R^{max}, помечены как A_1, A_2, B_1, B_2, C_1 и C_2. Видно, что экстремальные направления поверхности расположены симметрично относительно поворотной оси третьего порядка [111], что согласуется с известными результатами.

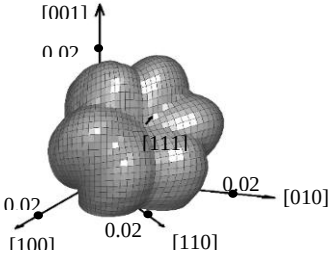


Рис. 1. Поверхность в сферической системе координат

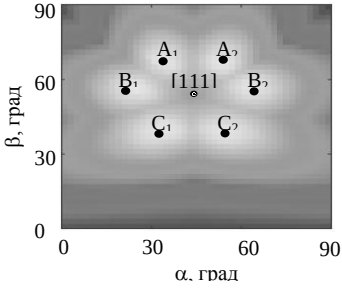


Рис. 2. Поверхность в прямоугольной системе координат

Список литературы

1. Одулов С.Г., Соскин М.С., Хижняк А.И. Лазеры на динамических решетках: оптические генераторы на четырехволновом смешении. М.: Наука, 1990.

2. Шандаров С.М., Шепелевич В.В., Хатьков Н.Д. // Опт. и спектр. 1989. Т. 67 (4). С. 819.

3. Навнько В.Н. // ЖТФ. 2024. Т. 94 (11). С. 1854.

Д.Н. МОСКАЛЕВ[1], В.В. КРИШТОП[1,2]
[1]*Пермский государственный национальный исследовательский университет*
[2]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

МЕЖМОДОВАЯ СВЯЗЬ В КОЛЬЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРАХ НА ОСНОВЕ ТОНКОПЛЁНОЧНОГО НИОБАТА ЛИТИЯ

Показано исследование состояния поляризации излучения в кольцевом резонаторе на основе волноводов из X-среза тонкоплёночного ниобата лития.

D.N. MOSKALEV[1], V.V. KRISHTOP[1,2]
[1]*Perm State National Research University*
[2]*Perm National Research Polytechnic University*

INTERMODE COUPLING IN A RING RESONATOR BASED ON THIN FILM LITHIUM NIOBATE

The results of a study on the polarization state of light in a ring resonator based on X-cut thin film lithium niobate waveguides are presented.

Фотонные интегральные схемы (ФИС) на основе тонкоплёночного ниобата лития (ТНЛ) находят применение при создании электрооптических модуляторов, устройств нелинейной фотоники [1].

Одним из важнейших элементов ФИС на основе ТНЛ является кольцевой резонатор (КР). КР применяется для фильтрации оптического спектра, с его помощью могут быт реализованы различные нелинейные эффекты, например, в КР могут генерироваться оптические гребёнки. Моделирование оптических свойств КР на основе X-среза ТНЛ является сложной задачей ввиду необходимости учёта влияния анизотропии на прохождение излучения. Обычно такие КР моделируют методом конечных разностей во временной области (КРВО) [2]. Однако данный метод является весьма ресурсоёмким, а также не слишком информативным в смысле состояния поляризации излучения (СПИ) внутри резонатора.

Целью настоящей работы является численное исследование оптических свойств анизотропного кольцевого резонатора.

Параметры КР были следующие: ширина волновода W_t = 1,4 мкм; толщина волноводной плёнки H_f = 0,7 мкм; глубина травления H_e = 0.4 мкм; угол наклона боковой стенки θ = 72 °; покровный слой – воздух; волноводная структура ориентирована вдоль

Y-кристаллографической оси; зазор g в направленном ответвителе составляет 0,57 мкм; R кольца – 100 мкм.

В ходе моделирования были рассчитаны: интенсивность TE- (рис. 1a) и TM-мод (рис. 1b), а также СПИ (рис. 1c) в каждой точке КР с помощью метода на основе теории связанных мод [3]. Кроме того, с помощью разработанной модели, был получен оптический спектр КР и вычислен свободный спектральный диапазон (Free spectral range, FSR) для TE- (рис. 2a) и для TM-моды (рис. 2b). Также, моделирование показало, что на длине волны 1,539 мкм происходит гибридизация TE- и TM-мод.

В свою очередь, результаты расчёта оптического спектра КР показали высокую степень согласованности экспериментальных данных, представленных в [2], с полученными в ходе моделирования результатами. Однако присутствует сильное расхождение экспериментальных и численных результатов на длине волны гибридизации.

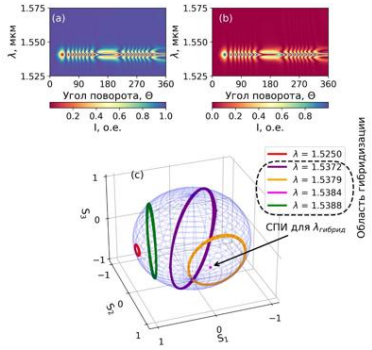


Рис. 1. Результаты исследования СПИ

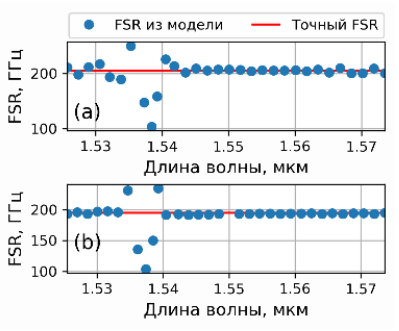


Рис. 2. Зависимость FSR от длины волны

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2023-0006).

Список литературы

1. Xie Z., et al. // Advances in Physics: X. 2024. V. 9 (1). P. 2322739.
2. Pan A., et al. // Optics express. 2019. V. 27. (24). P. 35659-35669.
3. Москалев Д.Н., Вобликов Е.Д., Криштоп В.В., Максименко В.А., Волынцев А.Б. // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. Т. 67. № 8.

УДК 535(06)+004(06)

В.И. ПАВЛОВ
Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская обл.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МИКРОРЕЗОНАТОРА ИЗ ФТОРИДА МАГНИЯ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ФЛУКТУАЦИЙ РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ

Тепловые эффекты в оптических микрорезонаторах вызывают флуктуации резонансных частот, что ограничивает их применение в практических устройствах. Однако в данной работе продемонстрировано, что при правильном соотношении между температурой и радиусом микрорезонаторов из MgF_2 возможно компенсировать флуктуации частоты.

V.I. PAVLOV
Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radioengineering, Mendeleevo, Moscow region

OPTIMIZATION OF MAGNESIUM FLUORIDE MICRORESONATOR PARAMETERS TO MINIMIZE RESONANCE FREQUENCY FLUCTUATIONS

Thermal effects in optical microresonators cause fluctuations in resonant frequencies, which limits their application in practical devices. However, this work demonstrates that with the right relationship between temperature and radius of MgF_2 microresonators, it is possible to compensate for frequency fluctuations.

Кристаллические микрорезонаторы из фторида магния (MgF_2) демонстрируют сверхвысокую добротность [1], однако терморефрактивные флуктуации резонансных частот [2] могут быть критичными практически во всех прецизионных приложениях, таких как атомные оптические стандарты частоты [3]. Чтобы повысить стабильность частоты, были предложены разные подходы. Криогенное охлаждение является одним из подходов к стабилизации резонансных частот [4]. Однако такой метод нередко ухудшает компактность и удобство системы.

Мы разработали совершенно новый метод стабилизации собственных частот – нагрев микрорезонатора. Известно, что для многих кристаллов, используемых в оптике, существует сложная температурная зависимость тепловых параметров (теплового расширения и термооптического коэффициента) [5]. В нашей работе мы использовали температурную

зависимость термооптического коэффициента в кристаллических микрорезонаторах MgF_2

$$\frac{\partial n(T)}{\partial T} = (0.04 - 5.6 \cdot 10^{-4} \cdot T) \cdot 10^{-5}. .$$

В результате учёта температурной зависимости термооптического коэффициента фторида магния найдена температура микрорезонатора, при которой терморефрактивный шум становится минимальным. Получено, что при 348 K, в точке нулевой терморефракции для микрорезонаторов больших радиусов ($\approx R_0 > 2$ мм) наблюдается значительное снижение шума. На рис. 1 видно, что при 348 K в диапазоне частот (3 Гц; 10^5 Гц) шум в элементе связи превосходит шум в микрорезонаторе и, следовательно, флуктуации в элементе связи будут определять ширину линии генерации для данной системы.

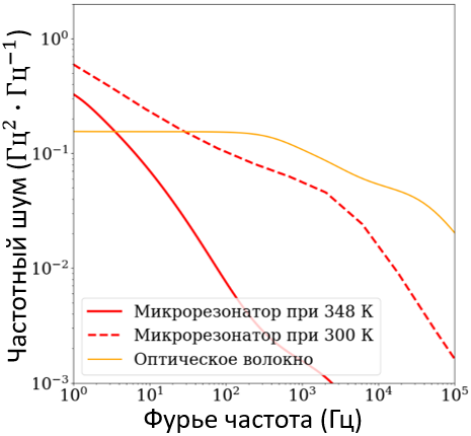


Рис. 1. Графики частотного шума: жёлтая сплошная линия – шум в элементе связи для случая оптического волокна SMF-28 с сердцевиной диаметром 9.2 мкм и длиной 40 см (добротность микрорезонатора 10^8); красная пунктирная и сплошная линии – шум дискового микрорезонатора из MgF_2 радиусом R_0 = 3.5 мм при температурах 300 и 348 K соответственно

Список литературы

1. Qu Z., Liu X., et al. // Opt. Express. 2023. V. 31. P. 3005-3016.
2. Lim J., Savchenkov A.A., et al // Nat Commun. 2017.V. l8. P. 8.
3. Newman Z.L., Maurice V., et al. // Optica. 2019. V. 6. P. 680-685.
4. Moille G., Lu X., et al. // Phys. Rev. Applied. 2019. V. 12. P. 034057.
5. Tropf W.J. // Optical Engineering. 1995. V. 34 P. 5.

УДК 535(06)+004(06)

К.А. ОВЧИННИКОВ[1,2], Д.Г. ГИЛЕВ[1,2], В.В. КРИШТОП[1,2,3]
[1]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет*
[2]*Пермская научно-производственная приборостроительная компания*
[3]*Пермский государственный национальный исследовательский университет*

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В РЕЗОНАТОРНО-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ СХЕМЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

Приводится теоретическое описание взаимодействия полей в резонаторно-интерферометрической схеме волоконно-оптического гироскопа с широкополосным источником света. Представлена аналитическая формула, которая описывает результирующее выходное излучение, его связь с эффектом Саньяка и связь с модулирующим сигналом. Представлено сравнение численного моделирования передаточной характеристики гироскопа, основанный на выведенной формуле с экспериментально полученной кривой.

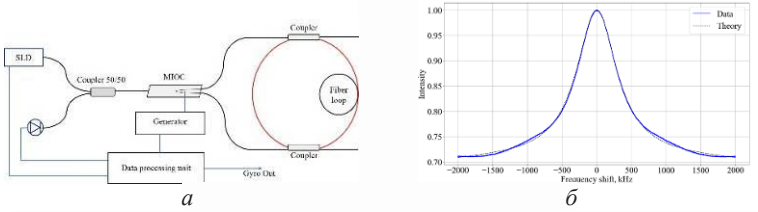
K.A. OVCHINNIKOV[1,2], D.G. GILEV[1,2], V.V. KRISHTOP[1,2,3]
[1]*Perm National Research Polytechnic University*
[2]*Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company*
[3]*Perm State National Research University*

INTERACTION OF OPTICAL FIELDS IN THE RESONATOR-INTERFEROMETRIC SCHEME OF A FIBER-OPTIC GYROSCOPE

A theoretical description of the interaction of fields in the resonator-interferometric scheme of a fiber-optic gyroscope with a broadband light source is given. An analytical formula is presented that describes the resulting output radiation, its connection with the Sagnac effect and the connection with the modulating signal. A comparison of the numerical simulation of the gyroscope transfer characteristic based on the derived formula with the experimentally obtained curve is presented.

Резонаторные волоконно-оптические гироскопы (РВОГ) являются перспективным устройством для решения задач миниатюризации. Применение кольцевых резонаторов в качестве чувствительного элемента (рис. 1) благодаря многократному прохождению света по замкнутому пути позволяет усилить эффект Саньяка и достигать той же теоретической чувствительности, что и традиционный ВОГ, при меньших размерах [1, 2]. Применение широкополосного источника света позволяет значительно уменьшить влияние шумов обратно-рассеянного излучения, а также,

благодаря многолучевой интерференции резонансных спектров, позволяет уйти от частотной синхронизации, применяемой в РВОГ с узкополосным источником излучения. Данный подход упрощает схему обработки сигналов и повышает стабильность работы. Также схожесть характера результирующего сигнала резонаторной схемы с традиционной позволяет применять те же схемы обработки сигналов с небольшими доработками.



а *б*

Рис. 1. Схема резонаторно-интерферометрического волоконно-оптического гироскопа (*а*); сравнение экспериментальной и теоретической зависимости изменения интенсивности РВОГ от частоты смещения (*б*)

Результирующая формула, описывающая изменение мощности, приходящей на фотодиод имеет вид:

$$P_{PD} = P_{in}(1-R)^2\left[\frac{1}{(1-R^2)} + \frac{(1-R^2)\cos\left(\frac{2\pi}{FSR}\frac{L_2}{2}\right)}{1-2R^2\cos\left(\frac{2\pi}{FSR}f_s\right)+R^4}\right], \quad (1)$$

где P_{in} – входная мощность от источника излучения, R – коэффициент связи делителей по мощности, FSR – область свободной дисперсии кольцевого резонатора, f_s – частота смещения, вызываемая эффектом Саньяка и внешним сигналом, подаваемым на модулятор.

Мы рассмотрели взаимодействие полей в резонаторной схеме гироскопа и вывели результирующую формулу для результирующего сигнала и его связь с сигналом модуляции и эффектом Саньяка. Важно уточнить, что данный расчёт приведён для идеального случая и не учитывает потери оптической схемы, а также дополнительные эффекты такие так обратные отражения и рассеяния. Полученная формула поможет проводить более быстрые вычисления для моделирования при разработке РВОГ с широкополосным источником излучения и более глубоко понимать принцип работы данной схемы РВОГ.

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2023-0006).

Список литературы

1. Овчинников К.А., Гилев Д.Г., Криштоп В.В. // Прикладная фотоника. 2024. Т. 11. № 2. С. 36-48.

2. Ovchinnikov K.A., et al. // Sensors. 2023. V. 23. P. 1319.

УДК 535(06)+004(06)

К.А. РУДОЙ, О.Ю. ПИКУЛЬ
Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск

АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЯ КОЛЕЦ-ИЗОХРОМ НА КОНОСКОПИЧЕСКИХ КАРТИНАХ ГИРОТРОПНЫХ КРИСТАЛЛОВ ПРИ ВРАЩЕНИИ АНАЛИЗАТОРА

Лазерная коноскопия кристаллических образцов парателлурита и иодата лития позволила установить, что при повороте анализатора угол поворота плоскости поляризации практически неизменен при отклонении от оптической оси в пределах от 0 до 1,5 °, а затем плавно уменьшается и при отклонении на 3 ° становится равным нулю. В области углов, соответствующих спаду оптической активности, происходит возрастание эллиптичности прошедшего излучения, и начинает более явно проявляться двойное лучепреломление кристалла. Приведены экспериментальные зависимости углового диаметра колец-изохром от угла поворота анализатора.

K.A. RUDOY, O.Yu. PIKOUL
Far Eastern State Transport University, Khabarovsk

ANALYZING THE MOVEMENT OF ISOCHROME RINGS ON CONOSCOPIC PATTERNS OF GYROTROPIC CRYSTALS AT ANALYZER ROTATION

Laser conoscopy of crystalline samples of lithium paratellurite and lithium iodate at analyzer rotation allowed us to establish that the angle of rotation of the polarization plane is practically unchanged at deviation from the optical axis within the range from 0 to 1.5 °, and then smoothly decreases and at deviation by 3 ° becomes equal to zero. In the region of angles corresponding to the decline of optical activity, the ellipticity of the transmitted radiation increases, and the double refraction of the crystal begins to appear more clearly. Experimental dependences of the angular diameter of the isochrome rings on the angle of rotation of the analyzer are given.

Парателлурит и иодат лития представляют собой гиротропные кристаллы и являются распространёнными функциональными материалами электронной техники в силу уникальности своих характеристик, однако, существуют трудности выделения вклада гиротропии в характеристики прошедшего и отражённого света [1].

Перед началом эксперимента анализатор повернут так, что в центре коноскопической картины на экране находится тёмное пятно. В этом случае скомпенсирован поворот вектора E для луча, проходящего через кристалл вдоль оптической оси. При дальнейшем непрерывном повороте

анализатора центральное тёмное пятно превращается в тёмное кольцо, диаметр которого непрерывно растёт от центра к периферии (все образцы правовращающие). Диаметр кольца определяет направление волновой нормали прошедшего света, а угол β на анализаторе обозначает новое положение вектора напряжённости E для данной волновой нормали. На рис. 1*а* представлены зависимости диаметра кольца $2\phi_i$ от угла поворота анализатора β для разных кристаллов. На рис. 1*б* видно, что угол поворота χ плоскости поляризации излучения, прошедшего через кристаллическую пластинку, практически неизменен в области значений φ_s, 0 - 1,5 °, затем уменьшается, и для $\varphi_s \approx 3$ ° равен нулю. Для значений углов φ_s, превышающих 3 °, большая ось эллипса поляризации испытывает осцилляции (на рис. 1*б* осцилляции не показаны). Отметим, что метод измерения изменения поворота плоскости поляризации (большой оси эллипса поляризации) χ по изменяющимся коноскопическим картинам имеет достаточно высокую точность в области углов $\varphi_s \approx 0 - 5^0$. При значениях углов φ_s, превышающих 5^0, ветви-изогиры «мальтийского креста» затрудняют измерения.

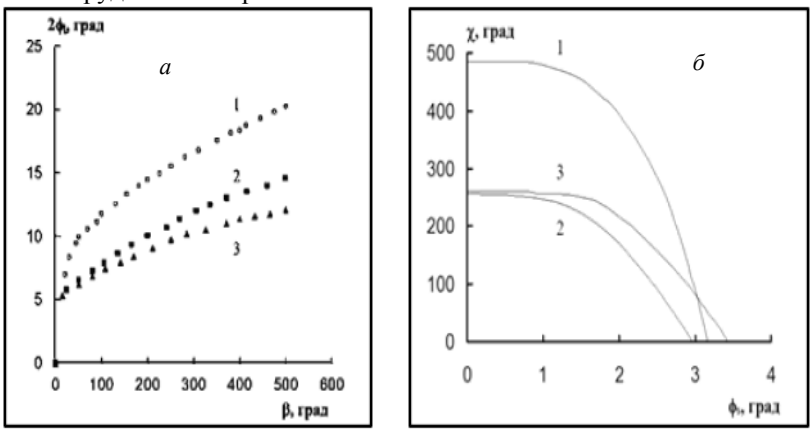


Рис. 1. Зависимость углового диаметра $2\varphi_i$ кольца от угла поворота анализатора β, кристаллы: 1 – TeO_2; 2, 3 – $LiJO_3$, толщина кристаллов, мм: 1, 2 – 3; 3 – 5, 7. (*а*); зависимость величины оптической активности α при отходе лучей от оптической оси кристалла на угол φ_s, кристаллы: 1,3 – $LiJO_3$, 2 – TeO_2, толщина, мм: 1 – 5,7; 2, 3 – 3 (*б*)

Список литературы

1. Сидоров Н.В., Пикуль О.Ю., Теплякова Н.А., Палатников М.Н. Лазерная коноскопия и фотоиндуцированное рассеяние света в исследованиях свойств нелинейно-оптического кристалла ниобата лития. М.: РАН, 2019.

УДК 535(06)+004(06)

М.С. МАНУКЯН, Е.В. СТРОГАНОВА
Кубанский государственный университет, Краснодар

МАКЕТ ФОТОННОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ДВУХКАНАЛЬНОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Приведены результаты моделирования усиления излучения накачки в условиях структуры, состоящей из монокристаллической пластины $LiNbO_3$, легированного редкоземельными элементами Er и Yb, а также слоя оптической керамики состава $LiNbO_3$:Er, для спектральных диапазонов 1,5 и 3 мкм.

M.S. MANUKYAN, E.V. STROGANOVA
Kuban State University, Krasnodar

DESIGN OF A PHOTONIC DEVICE FOR DUAL CHANNEL GENERATION

Presents the result of modeling the amplification of pump radiation in a structure consisting of a monocrystalline plate of $LiNbO_3$ doped with rare earth elements Er and Yb, as well as a layer of optical ceramics composed of $LiNbO_3$:Er, for spectral ranges of 1,5 and 3 mkm.

Целью работы является разработка основы макета оптического устройства на базе ниобата лития, для генерации излучения в двухканальном режиме диапазонов в области 1,5 и 3 мкм. На рис. 1 показана структура макета резонатора Фабри-Перо с активным элементом, расположенным вдоль оси Z. Излучение накачки для оптической системы – 970 нм.

Создание условий двухволновой генерации предполагает нестандартную структуру зеркал резонатора с покрытием SiO_2, толщина которого рассчитываются в соответствии с законом Френеля [1, 2]. На рис. 2 представлены спектры отражений исследуемых зеркал с найденным оптимальным значением толщины плёнки 343,5 нм. При моделировании процесса усиления мощности в слоистой структуре на основе $LiNbO_3$ было задано неравномерное легирование кристалла ионами Er и Yb (рис. 3).

Для достижения эффективного обмена энергией между примесными центрами рассматривалось два прохода резонатора для достижения доли возбуждённых акцепторов порядка 95 % [3, 4].

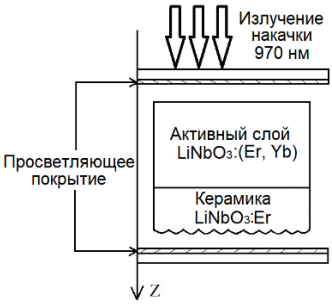


Рис. 1. Структурная картина, моделируемого устройства

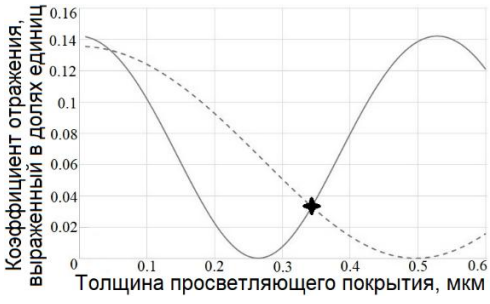


Рис. 2. Спектры отражений зеркал с покрытием SiO_2 на 1,5 и 2,9 мкм

Результаты моделирования двухканальной генерационной системы с рассмотренной структурой зеркал демонстрируют увеличение мощности излучения в области 1,5 мкм в 3,8 аза относительно стандартных зеркал и в 2,93 раза увеличение мощности в области 2,9 мкм. На рис. 4 приведены графики изменения мощности на 1,5 и 2,9 мкм.

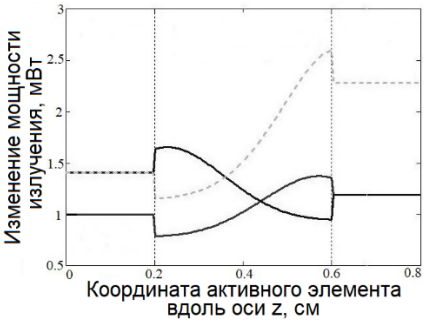


Рис. 3. Усиление излучения в кристалле с неравномерным легированием

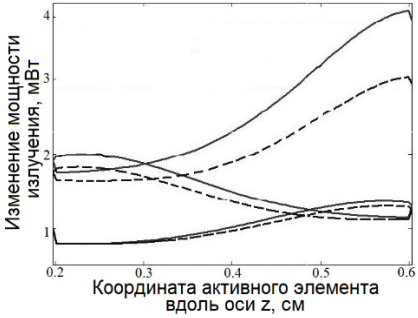


Рис. 4. Усиление мощности накачки на 1,5 и 2,9 мкм с плёнкой

Список литературы

1. Ершов А.В., Карабанова И.А. Интерференционные многослойные зеркала в оптоэлектронике. Нижнй Новгород. 2007.

2. Willey R.R. Field guide to optical thin films. Ronald R. Willey. 2006.

3. Строганова Е.В. Исследование, синтез и выращивание оптических градиентно-активированных кристаллов на основе $LiNbO_3$. Краснодар, 2017.

4. Цема А.А. Спектрально-люминесцентные и кинетические исследования градиентно-активированных кристаллов ниобата лития с оптическими центрами Yb^{3+}, Er^{3+}. Краснодар, 2019.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. СОСУНОВ, М.И. ПЕТУХОВ, Е.Д. САВЕЛЬЕВ[1], В.Я. ШУР[1]
Пермский государственный национальный исследовательский университет
[1]Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, Екатеринбург

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГРАДИЕНТНЫХ КАНАЛЬНЫХ ПРОТОНООБМЕННЫХ ВОЛНОВОДОВ В МОНОКРИСТАЛЛАХ И ТВЁРДЫХ РАСТВОРАХ

Разработан метод определения основных параметров протонообменных волноводов в различных материалах с помощью конфокальной микроскопии комбинационного рассеяния. Данный метод может быть использован для быстрого, неразрушающего контроля параметров волноводов при изготовлении интегрально-оптических схем, модуляторов и датчиков.

A.V. SOSUNOV, M.I. PETUKHOV, E.D. SAVELYEV[1], V.Ya. SHUR[1]
Perm State National Research University
[1]Ural Federal University, Yekaterinburg

METHOD FOR DETERMING THE PARAMETERS OF GRADIENT CHANNEL PROTON-EXCHANGE WAVEGUIDES IN SINGLE CRYSTALS AND SOLID SOLUTIONS

A method for determining the main parameters of proton-exchange waveguides in various materials using confocal Raman microscopy has been developed. This method can be used for rapid, non-destructive testing of waveguide parameters in the manufacture of integrated optical circuits, modulators, and sensors.

Протонный обмен (ПО) один из широко распространённых методов создания оптических волноводов и различных диэлектрических слоёв в монокристаллах. Существуют различные методы определения основных параметров (профиль, глубина, приращение показателя преломления) такие как, призменный элемент связи [1], теоретические модели [2] и генерация второй гармоники [3]. Наиболее простым способом реконструкции профиля волновода является метод конфокальной микроскопии комбинационного рассеяния.

Целью данной работы является анализ возможности применения метода конфокальной микроскопии комбинационного рассеяния для реконструкции профилей протонообменных волноводов, сформированных

в кристаллах ниобата лития (НЛ) и смешанного твёрдого раствора ниобата-танталата лития (ЛНТ).

Для определения распределения концентрации протонов *C(Z,X)* использовали конфокальный микроскоп Alpha 300 AR, WiTec (Германия), оборудованный твердотельным лазером с длиной волны 488 нм и мощностью до 27 мВт и дифракционной решёткой с 1800 шт/мм, что обеспечивало спектральное разрешение 1.2 $см^{-1}$. Для определения относительной концентрации протонов измеряли интенсивность спектральной линии 3492 $см^{-1}$, соответствующей колебаниям ОН-групп. Линию аппроксимировали функцией Лоренца. Для определения градиента концентрации протонов в исследуемых образцах проводили измерения спектров с минимальным шагом пьезостолика 0.25 мкм по глубине волноводного слоя *d*. Из каждого спектра вычитали фон, а затем чтобы результаты не зависели от мощности лазера, все спектры одной серии нормировали на интенсивность линии 976 $см^{-1}$ на глубине 23.2 мкм,. Затем строили зависимость максимальной амплитуды функции Лоренца от глубины волноводного слоя. Волноводы формировались во всех образцах при идентичных параметрах в зависимости от кристаллографической ориентации. Теория подразумевает решение классического уравнения диффузии при заданных параметрах протонного обмена.

В данной работе предложен новый подход в определении основных параметров градиентных протонообменных волноводов с помощью конфокальной микроскопии комбинационного рассеяния. Показано хорошее согласие теоретических и экспериментально полученных результатов. Согласие результатов, полученных из спектров комбинационного рассеяния и с использованием призменной связи, подтверждает эффективность данного метода для образцов *Z*-среза. Для кристаллов *X*-среза предложенный подход дает противоречивые результаты. Уникальность данного метода заключается в том, что он достаточно простой, неразрушающий и может быть использован для канальных волноводов на различных этапах изготовления интегрально-оптических схем, нелинейно-оптических устройств и датчиков. Он может быть использован в дополнение к методу призменной связи, который применим только для планарных волноводов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ и Пермского края № 24-22-20097.

Список литературы:

1. White J.M., Heidrich P.F. // Appl. Opt. 1976. V. 15. No. 1. P. 151.
2. Lenzini F., Kasture S., Haylock B., Lobino M // Opt. Express. 2015. V. 23. P. 1748.
3. Neradovskiy M., et al. // JLT. 2021. V. 39. No. 14. P. 4695.

УДК 535(06)+004(06)

В.П. ПРОХОРОВ, Н.А. ЯКОВЕНКО
Кубанский государственный университет, Краснодар

ЧИСЛЕННАЯ АППРОКСИМАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГРАДИЕНТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ

Предложен метод численной аппроксимации максимального приращения показателя преломления Δn волновода и его эффективной глубины d для градиентных оптических волноводов на основе оптимизации точек пересечения дисперсионных модовых кривых в координатах (Δn, d). Выполнена аппроксимация параметров (Δn, d) для ионообменных Ag^+:К8- и Ag^+:КФ4-волноводов с erfc-профилем.

V.P. PROKHOROV, N.A. YAKOVENKO
Kuban State University, Krasnodar

NUMERICAL APPROXIMATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF GRADED-INDEX OPTICAL WAVEGUIDES

A method for numerical approximation of the maximum increment of the refractive index Δn of a waveguide and its effective depth d for gradient optical waveguides based on optimization of intersection points of dispersion mode curves in coordinates (Δn, d) is proposed. Parameters (Δn, d) were approximated for ion-exchange Ag^+:K8- and Ag^+:KF4 waveguides with erfc-profile.

Для моделирования параметров градиентных волноводов важна задача численной аппроксимации экспериментально неопределяемых технологических параметров – максимального приращения показателя преломления Δn волновода и его эффективной глубины d [1]. Данная методика имеет полуэмпирический характер, поскольку источником теоретического расчёта являются экспериментальные значения эффективных показателей преломления $\{ N_m^{\text{эксп}} \}$ волноводных мод, где индекс $m = 0, 1, 2, \ldots, m_{\max}$ характеризует порядок волноводной моды. Возможные методы численной аппроксимации параметров (Δn, d) градиентных оптических волноводов рассмотрены в работе [1].

Рассмотрим численную аппроксимацию параметров (Δn, d) на основе оптимизации точек пересечения дисперсионных модовых кривых в координатах (Δn, d) (аналог – метод транспортной задачи).

В этом методе проводится исследование семейства дисперсионных кривых $d(\Delta n, m)$ для соответствующих значений $\{ N_m^{\text{эксп}} \}$. Для $(m_{\max} + 1)$-модового волновода дисперсионные модовые кривые $d(\Delta n, m)$ на координатной сетке (Δn, d) определяются системой [1]

$$\left\{ d(m, \Delta n) = \frac{\operatorname{arctg}\left[r_a \sqrt{\dfrac{(N_m^{\text{эксп}})^2 - n_c^2}{(n_s + \Delta n)^2 - (N_m^{\text{эксп}})^2}} \right] + \left(m + \frac{1}{4} \right) \pi}{k_0 d \sqrt{2 n_s \Delta n} \displaystyle\int_0^{x_{tm}} \sqrt{\operatorname{erfc}(x) - \operatorname{erfc}(x_{tm})}\, dx} \right\},$$

где точки поворота x_{tm} для каждого значения Δn определяются из решений соответствующих дисперсионных уравнений [1].

Попарные пересечения кривых параметрического семейства $\{d(m, \Delta n)\}$ определяют $C_m^2 = m!/\,2!(m-2)!$ совместных решений на координатной сетке (Δn, d).

Указанные точки образуют исходный эмпирический набор данных. Нам нужно определить пару значений (Δn_{opt}, d_{opt}), которая обеспечивает минимум суммарному расстоянию этой точки от всех имеющихся $C_{m_{\max}+1}^2$ точек на плоскости (модифицированный вариант метода транспортной задачи). Следовательно, мы должны минимизировать функционал

$$\Phi(\Delta n, d) = \sum_{m=0}^{C_{m_{\max}}^2} \sqrt{(\Delta n - \Delta n_m)^2 + (d - d_m)^2}\ .$$

Значения (Δn_{opt}, d_{opt}), минимизирующие данный функционал, и будут являться полуэмпирической аппроксимацией искомых параметров.

Выполнены численные аппроксимации параметров (Δn, d) для ионообменных Ag^+:К8- и Ag^+:КФ4 -волноводов с erfc-профилем и погрешностью полученных решений $\sigma = 10^{-5} – 10^{-4}$.

Список литературы

1. Прохоров В.П., Яковенко Н.А. Моделирование физико-технологических параметров оптических ионообменных волноводов. Краснодар: Кубанский государственный университет, 2014.

УДК 535(06)+004(06)

Д.А. КОРНИЛИН, Р.С. ПОНОМАРЕВ, В.А. ДЕМИН
Пермский государственный национальный исследовательский университет

КАПЛЕОБРАЗОВАНИЕ ПЛАВИКОВОЙ КИСЛОТЫ НА ОБОЛОЧКЕ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА В ХОДЕ ТРАВЛЕНИЯ

Приведены результаты по оценке влияния капель жидкости плавиковой кислоты на поверхности волокна в воздушной среде при получении заготовок линзованных оптических волокон методом химического травления. Показано, что эффект каплеобразования необходимо учитывать при получении заготовок линзованных оптических волокон с заданными свойствами.

D.A. KORNILIN, R.S. PONOMAREV, V.A. DEMIN
Perm State National Research University

DROPLET FORMATION OF HYDROFLUORIC ACID ON THE CLADDING OF THE OPTICAL FIBER DURING ETCHING

The research represents results of evaluating the effect of hydrofluoric acid liquid droplets on the fiber surface in an air environment during the production of lensed optical fiber preforms by chemical etching. It is shown that the effect of droplet formation must be considered at obtaining preforms of lensed optical fibers with specified properties.

При изготовлении линзованных оптических волокон методом химического травления необходимо учитывать множество факторов, влияющих на качество заготовки [1 - 5]. Ранее было выявлено, что на форму конуса заготовок оптических линз может влиять толщина буферного слоя [1, 2], благодаря чему возможно изготовление заготовок линзованных оптических волокон с различной геометрией. Не менее важно качество оболочки оптического волокна выше торца, непосредственно влияющее на прочность изделия.

Целью данной работы является оценка влияния капель травителя, образующихся в процессе получения заготовок линзованных оптических волокон при помощи метода объёмного химического травления. В качестве травителя использовался 40-процентный раствор плавиковой кислоты, а в качестве буферного слоя – ксилол. Материалом для заготовок служило одномодовое оптическое волокно.

Во время травления уже через 3 - 5 мин после начала процесса становятся заметны зародыши капель жидкости, формирующиеся в воздушной среде на поверхности волокна примерно на одинаковом расстоянии друг от друга. Затем происходит их увеличение с последующим соединением в большую каплю ближе к поверхности буферного слоя (рис. 1) и постепенное стекание в объём травителя.



Рис. 1. Процесс образования капель травителя на поверхности ОВ:
слева – конец волокна находится в объёме травителя,
справа – конец волокна находится в воздушной среде

Список литературы

1. Корнилин Д.А., Пономарев Р.С., Демин В.А. Экспериментальное исследование влияния толщины буферного слоя на форму заготовок для линзованных оптических волокон // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2024. Т. 21. № 3. С. 396–403.

2. Корнилин Д.А., Пономарев Р.С., Демин В.А. Влияние толщины буферного слоя на форму линзованных оптических волокон // XII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сбор. науч. тр. М.: НИЯУ МИФИ, 2024. С. 435-436.

3. Meunier D., et al. Controlled-chemical etching of the cladding in optical fibers for the design of analytical sensors // Optical Fiber Technology. 2023. V. 78. P. 103328.

4. Yuan Y., et al. Theory, experiment, and application of optical fiber etching // Appl Opt. 2012. V. 51. No. 24. P. 5845.

5. Mononobe S., Ohtsu M. Fabrication of a pencil-shaped fiber probe for near-field optics by selective chemical etching // Journal of Lightwave Technology. 1996. V. 14. No. 10. P. 2231-2235.

УДК 535(06)+004(06)

А.А. МОТОВИЛОВ, И.В. БОГАЧКОВ
Омский государственный технический университет

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА КВАРЦЕВОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

В работе представлен способ использования метода неразрушающего контроля прочности для прогнозирования остаточного ресурса оптического волокна.

A.A. MOTOVILOV, I.V. BOGACHKOV
Omsk State Technical University

APPLIYING OF A METHOD FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING OF THE STRENGTH TO PREDICT REMAINING USEFUL LIFE FOR SILICA OPTICAL FIBER

Presents a method for using non-destructive testing of the strength to predict remaining useful life prediction for a silica optical fiber.

Поскольку оптические волокна (ОВ) – основной компонент волоконно-оптических линий связи, показатели долговечности (такие как срок службы и остаточный ресурс) оптического кабеля определяются таковыми у ОВ. Также в настоящее время подходит к концу или уже вышел назначенный срок службы ОВ, заложенных 25 - 30 лет назад, и требуется разработать методику, позволяющую достоверно оценить остаточный ресурс ОВ. Таким образом, оценка остаточного ресурса ОВ и прогнозирование долговечности ОК являются актуальными задачами.

Используем следующие формулы для оценки ресурса ОВ. при выполнении условия

$$\sigma_a(t) / S(t) < r \ , \tag{1}$$

где $\sigma_a(t)$ – нагрузка, прикладываемая к ОВ в процессе его срока службы, r – норма, определяющая переход к разрушению ОВ; (если условие (1) не выполняется, то считается, что ОВ разрушено [1]);

$$S(t_{\min})^{n-2} = S(t_{\max})^{n-2} + \frac{1}{B}\int_{t_{\min}}^{t_{\max}} \left[\sigma_a(t)\right]^n dt \ , \tag{2}$$

где $S(t_{\min}), S(t_{\max})$ – прочность ОВ в начале и в конце ресурса ОВ $\Delta t = t_{\max} - t_{\min}$ в моменты времени $t_{\min}$ и $t_{\max}$ соответственно, B, n – параметры прочности плавленого кварцевого стекла.

Для оценки натяжения ОВ предлагается использовать данные бриллюэновского рефлектометра [2, 3]. Однако, для расчёта по формуле (2) недостаточно информации о натяжении волокна, требуется также знание его прочности (в статье [1] также уточняется, что метод бриллюэновской рефлектометрии позволяет оценить лишь остаточные напряжения, но не может применяться для измерения прочности волокна).

Для оценки прочности кварцевого ОВ предлагается метод неразрушающего контроля прочности волокна по оценкам энергии нелинейной акустической эмиссии, базирующийся на использовании тестируемого ОВ в качестве акустического сенсора [4].

Тестируемое ОВ подвергают направленному акустическому воздействию на одной частоте, равной 1 - 2 кГц. После этого фазочувствительным фотоприёмником, подключенным к данному ОВ, измеряют модулирующий по фазе оптическую несущую сигнал и анализируют его спектр, по которому оценивают амплитуду составляющей на частоте акустического воздействия и определяют оценку энергии нелинейной акустической эмиссии. Затем в тех же условиях повторяют описанную выше процедуру для эталонного оптического волокна, прочность которого известна [4].

Таким образом, получаем все необходимые данные для подстановки в формулу (2) и расчёта остаточного ресурса кварцевого ОВ.

Задачей дальнейших исследований будет являться построение и экспериментальная проверка математических моделей неразрушающего контроля прочности для ОВ, в состав которых помимо кварца входят различные легирующие вещества.

Список литературы

1. Андреев В.А., Бурдин В.А., Нижногородов А. Сценарии прогноза срока службы оптического волокна в КЛС // Первая миля. 2020. № 4. С. 34-43.

2. Богачков И.В., Горлов Н.И. Обнаружение механически напряжённых участков в волоконно-оптических линиях связи на основе анализа спектра бриллюэновского рассеяния // Телекоммуникации. 2015. № 11. С. 32-38.

3. Богачков И.В., Горлов Н.И. Экспериментальные исследования влияния продольных растягивающих нагрузок на спектр бриллюэновского рассеяния в оптических волокнах // Вестник СибГУТИ. 2015. Вып. 3 (31). С. 81-88.

4. Андреев В.А., Бурдин А.В., Бурдин В.А., Дашков Д.М. Метод неразрушающего контроля прочности кварцевого оптического волокна // Компьютерная оптика. 2022. Т. 46. № 2. С. 224-231.

УДК 535(06)+004(06)

А.М. ТИТОВА[1,2], Е.Ф. ЧЕПУРИН[1], А.С. БЕЛОВ[1],
А.А. СКРЫЛЕВ[2], А.В. НЕЖДАНОВ[2], А.И. БОБРОВ[2],
П.В. ВОЛКОВ[2], Д.В. ШЕСТАКОВ[2]
[1]Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова, филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ, Нижний Новгород
[2]Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ В ЕДИНОМ ЦИКЛЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАХА–ЦЕНДЕРА ПЛАНАРНОЙ И РЁБЕРНОЙ СТРУКТУРЫ

Разработана методика формирования интерферометра Маха–Цендера планарной и специальной рёберной структуры (RIB) в едином процессе КМОП-КНИ технологии. Данная методика позволила обеспечить бесшовный переход между различными типами структур, что способствовало снижению оптических потерь. Геометрические параметры RIB имели высокую воспроизводимость с отклонением, не превышающим 4 %. Наличие ребра над основанием элемента позволило существенно уменьшить потери в волноводе до ~ 2 дБ/см.

A.M. TITOVA[1,2], E.F. CHEPURIN[1], A.S. BELOV[1],
A.A. SKRYLEV[2], A.V. NEZHDANOV[2], A.I. BOBROV[2],
P.V. VOLKOV[2], D.V. SHESTAKOV[2]
[1]Yu.E. Sedakov Research Institute – branch of All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Nizhny Novgorod
[2]Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

TECHNOLOGY FOR FORMING A PLANAR AND RIB STRUCTURE IN A SINGLE CYCLE OF A MACH–ZEHNDER INTERFEROMETER

A technique for the formation of a Mach–Zender interferometer of a planar and special rib structure (ribs) in a single CMOS process has been developed. This technique allowed for a seamless transition between different types of structures, which helped to reduce optical losses. The geometric parameters of the EDGES, which were detected during production, do not exceed 4 %. The presence of an edge above the base of the element made it possible to significantly reduce losses in the waveguide to ~ 2 dB/cm.

Кремниевые интерферометры Маха–Цендера (МЦИ) являются ключевыми элементами современных фотонных интегральных схем, которые находят применение в телекоммуникациях, квантовых

вычислениях, сенсорах и системах обработки сигналов [1]. Эти устройства позволяют эффективно модулировать, фильтровать и направлять оптические сигналы, что делает их незаменимыми в системах, требующих высокой скорости обработки данных и низких потерь. Использование кремния в качестве материала для создания таких интерферометров обусловлено его дешевизной, доступностью, нетоксичностью и совместимостью с существующими КМОП-процессами [2]. Однако для минимизации оптических потерь необходима высокая точность геометрических параметров и воспроизводимость таких структур при их массовом производстве.

В ходе выполнения данной работы была разработана технология изготовления на гетероструктурах КНИ с высокоомным приборным слоем конструктивных элементов интерферрометров, характеризующихся планарной и рёберной структурой. Отличительной особенностью технологии является одновременное формирование планарных и рёберных структур за счёт применения двух последовательных этапов травления по жесткой маске оксида кремния. Такой подход обеспечивает бесшовный переход от планарных к рёберным структурам и исключает оптические потери, которые могут возникать на месте сопряжения структур различной конструкции в случае их формирования на разных этапах технологического маршрута за счёт эффекта рассовмещения и вариаций линейных размеров на операциях фотолитографии.

На полученных структурах провели измерения оптических потерь производили с использованием лазера на длине волны 1,55 мкм. Средние потери на ввод/вывод излучения на одну дифракционную решётку не полного травления составили $(4{,}7 \pm 0{,}7)$ дБ, что соответствует эффективности порядка 30 %. Потери в одиночном планарном волноводе составили 7 - 9 дБ/см, а в RIB-волноводах –1,8 - 2,0 дБ/см, что обусловлено меньшей шероховатостью стенок волновода. Использование термооптического эффекта в полученных интерферометрах Маха–Цендера позволяет достичь частоты переключения до 20 кГц.

Разработанная технология была интегрирована в стандартный КМОП-КНИ технологический процесс с двухуровневой металлизацией, позволяющей управлять термооптическими элементами, предназначенными для настройки интерференционных устройств типа Маха–Цендера.

Список литературы

1. Kim D.U., Lim M.G., et al. // Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference. 2023. P. 1.

2. Sinatkas G., Christopoulos T., et al. // Journal of Applied Physics. 2021. V. 130. P. 010901.

УДК 535(06)+004(06)

А.А. МОТОВИЛОВ, И.В. БОГАЧКОВ
Омский государственный технический университет

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ БРИЛЛЮЭНОВСКОГО РЕФЛЕКТОМЕТРА

В работе представлена математическая модель для прогнозирования остаточного ресурса оптического волокна на основе данных, полученных при использовании бриллюэновского рефлектометра.

A.A. MOTOVILOV, I.V. BOGACHKOV
Omsk State Technical University

REMAINING USEFUL LIFE PREDICTION FOR OPTICAL FIBER BASED ON BRILLOUIN REFLECTOMETER DATA

Presents the mathematical model of remaining useful life prediction for optical fiber based on Brillouin reflectometer data.

Прогнозирование остаточного ресурса оптического волокна (ОВ), находящегося в проложенном оптическом кабеле (ОК), оценка долговечности ОК с учётом внешних воздействий являются актуальными задачами.

Предлагается следующая формула для оценки ресурса ОВ при выполнении условия $\sigma_a(t)/S(t) < r$ (если условие не выполняется, считается, что ОВ разрушено) [1]:

$$S(t_{\min})^{n-2} = S(t_{\max})^{n-2} + \frac{1}{B}\int_{t_{\min}}^{t_{\max}} \left[\sigma_a(t)\right]^n dt\,, \qquad (1)$$

где $S(t_{\min}), S(t_{\max})$ – прочность ОВ в начале и в конце ресурса ОВ $\Delta t = t_{\max} - t_{\min}$ в моменты времени $t_{\min}$ и $t_{\max}$ соответственно, $\sigma_a(t)$ – нагрузка, прикладываемая к ОВ в процессе его срока службы, r – норма, определяющая переход к разрушению ОВ; B, n – параметры прочности плавленого кварцевого стекла.

Для оценки натяжения ОВ предлагается использовать данные бриллюэновского рефлектометра. По параметрам бриллюэновского рассеяния возможно установить степень натяжения ОВ [2], что

невозможно при использовании для мониторинга и диагностики релеевского рассеяния [3]. На рис. 1 и 2, представлены типичные рефлектограммы (релеевское и бриллюэновское рассеяния соответственно) ОВ под натяжением.



Рис. 1. Рефлектограмма OTDR для «проблемного» участка

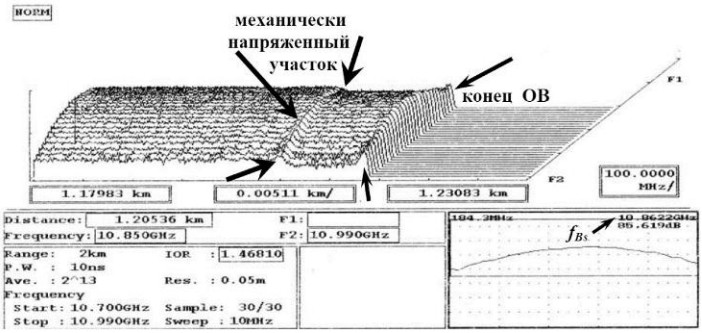


Рис. 2. Рефлектограмма BOTDR при растягивающем воздействии на участок ОВ

Как видно на рис. 2, по рефлектограмме бриллюэновского рассеяния возможно определить степень натяжения ОВ, а затем, подставляя полученные значения в формулу (1), корректировать прогноз остаточного ресурса ОВ в реальном времени.

Список литературы

1. Андреев В.А., Бурдин В.А., Нижногородов А. Сценарии прогноза срока службы оптического волокна в КЛС // Первая миля. 2020. № 4. С. 34-43.

2. Богачков И.В., Горлов Н.И. Обнаружение механически напряжённых участков в волоконно-оптических линиях связи на основе анализа спектра бриллюэновского рассеяния // Телекоммуникации. 2015. № 11. С. 32-38.

3. Богачков И.В., Горлов Н.И. Экспериментальные исследования влияния продольных растягивающих нагрузок на спектр бриллюэновского рассеяния в оптических волокнах // Вестник СибГУТИ. 2015. Вып. 3 (31). С. 81-88.

УДК 535(06)+004(06)

Н.С. ЛАСКАВЫЙ, А.А. ЖУРАВЛЕВ[1]
Пермский национальный исследовательский политехнический университет
[1]Пермский государственный национальный исследовательский университет

ВОЛОКОННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЛАЗЕРНЫМ ЛУЧОМ ДЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЁТКИ

В работе описываются пространственные оптические линии связи в атмосфере и безвоздушном пространстве, существующие и перспективные системы отклонения лазерного луча в терминалах оптической связи, технология оптических фазированных антенных решёток. Приведено объяснение преимуществ реализации фазированных антенных решёток на фотонных интегральных схемах. Описана экспериментальная установка и состав разработанной системы.

N.S. LASKAVYI, A.A. ZHURAVLEV[1]
Perm National Research Polytechnic University
[1]Perm State National Research University

FIBER LASER BEAM STEERING SYSTEM FOR FREE-SPACE OPTICAL COMMUNICATION BASED ON OPTICAL PHASED ARRAY

The paper briefly describes free-space optical communication lines in the atmosphere and airless space, existing and prospective laser beam steering systems in optical communication terminals, and the technology of optical phased antenna arrays. The article explains the advantages of implementing phased antenna arrays on photonic integrated circuits. It briefly describes experimental setup and composition of the developed system.

Оптические пространственные линии связи предназначены для создания защищённого и высокоскоростного канала, устойчивого к радиопомехам. Они состоят из передающего устройства, генерирующего инфракрасные электромагнитные волны, и принимающего устройства, которое их регистрирует. Основное ограничение — необходимость прямой видимости между устройствами, что требует учёта погодных условий, ухудшающих видимость, таких как туман или дождь. В космосе

эти факторы отсутствуют, что способствует широкому применению таких систем в космических коммуникациях.

В оптических терминалах космических систем связи для управления лазерным лучом используются оптико-механические устройства, включающие фокусирующие элементы и вращающиеся зеркала или призмы. Однако такие устройства имеют недостатки: инертность управления, высокое потребление энергии, недолговечность и большие размеры. Они подходят для крупных спутников, но для микроспутников необходимы другие технологии. Перспективной является оптическая фазированная антенная решётка, которая управляет направлением луча путём изменения диаграммы направленности через амплитуду и фазу сигнала на каждом элементе. Эта технология обеспечивает высокую скорость управления, большой диапазон сканирования и низкое электропотребление. Предложено множество реализаций данной технологии, но наиболее перспективным считается исполнение на основе фотонных интегральных схем [1 - 3].

В рамках практического эксперимента была создана установка для измерения параметров отклоняющей системы и фазированной антенной решётки. Эта система включала лазерный источник оптического излучения, генерирующий квазимонохроматический сигнал с длиной волны $\lambda = 1550$ нм, комплекс фазовых оптических модуляторов, которые изменяли фазу при приложении электрического поля, и семиканальную волоконную излучающую систему.

Моделирование фазированной антенной решётки было выполнено с использованием Matlab Phased Array System Toolbox, при этом учитывалась рабочая длина волны $\lambda = 1550$ нм и расстояние между элементами, равное примерно 40λ. Результатом работы стала модель, соответствующая экспериментальным данным, а также реализованная оптическая фазированная антенная решётка с диапазоном управления лучом $\pm 7{,}5\,^{\circ}$ и полушириной основного максимума $2\,'$.

Список литературы

1. Guo Y., Guo Y., Li C., Zhang H., Zhou X., Zhang L // Appl. Sci. 2021. V. 11. P. 4017.
2. Zhao S., Chen J., Shi Y. // Micromachines. 2022. V. 13. P. 894.
3. Qu R.H., Ye Q., Dong Z.R., et al.: // Lasers. 2008. V. 35 (12). P. 1861-1867.

УДК 535(06)+004(06)

Е.Ю. ЗЛОКАЗОВ, М.И. КАЗЬМИН, В.А. НЕБАВСКИЙ,
Д.А. ТРЕТЬЯКОВ, Р.С. СТАРИКОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

СОБСТВЕННЫЕ СОСТОЯНИЯ «КЛАССИЧЕСКОГО» ВОЛОКОННОГО ОПТОЭЛЕКТРОННОГО СВЧ-ГЕНЕРАТОРА

Обсуждаются собственные колебания оптоэлектронного генератора СВЧ, удовлетворяющие условиям существования самоподдерживающихся колебаний в оптической и электронных частях оптоэлектронного генератора.

E.Yu. ZLOKAZOV, M.I. KAZMIN, V.A. NEBAVSKIY,
R.S. STARIKOV, D.A. TRETYAKOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

EIGENSTATES OF A CONVENTIONAL FIBER OPTOELECTRONIC OSCILLATOR

The eigenoscillations of an optoelectronic oscillator are discussed, satisfying the conditions for the existence of self-sustaining oscillations in the optical and electronic parts of the optoelectronic oscillator.

Генерация сигналов играет важную роль как в СВЧ-технике, так и в фотонике. Оптоэлектронные генераторы (ОЭГ) позволяют синтезировать сигналы с несущими в десятки ГГц и с уровнем фазовых шумов ниже – 160 дБн/Гц при отстройке в 10 кГц от несущей, таким образом ОЭГ обеспечивают высокое качество генерируемого сигнала.

В силу своей автоколебательной природы ОЭГ обладают набором собственных частот, которые испытывают положительную селекцию за счёт организации положительной обратной связи, собственные частоты находятся на одинаковом частотном расстоянии друг от друга, однозначно определяемом добротностью всей петли.

В данной работе изучались особенности работы ОЭГ без СВЧ-фильтра (рис. 1). Осциллографируя генерируемые ОЭГ сигналы и измеряя их спектры (рис. 2), можно получить информацию о модовом составе, а значит и о специфике работы элементов в составе ОЭГ.

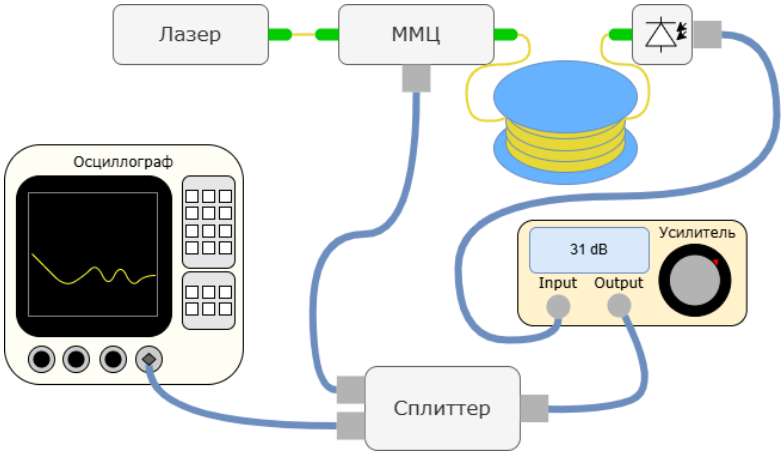


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки оптоэлектронного автогенератора

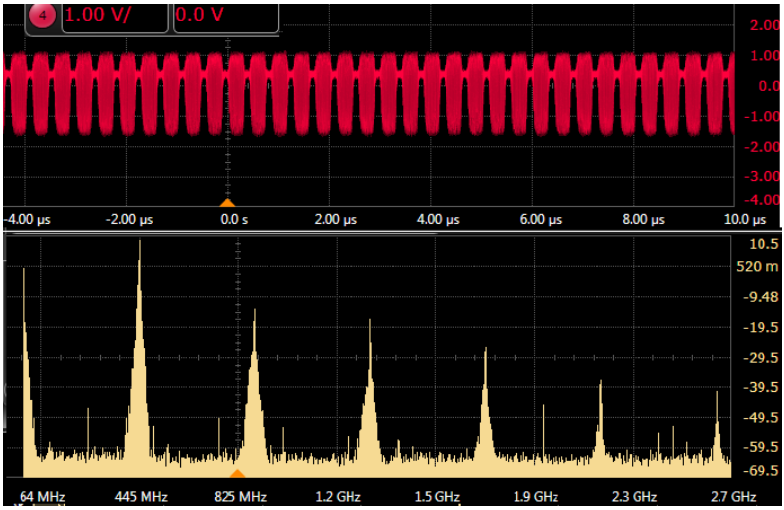


Рис. 2. Осциллограмма и спектр сигнала ОЭГ, работающего в свободном состоянии

Работа выполнена при поддержке РНФ, грант № 24-19-00898.

УДК 535(06)+004(06)

А.А. КАВАЛЕНЯ, А.В. ПОЛЯКОВ
Белорусский государственный университет, Минск

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ЧАСТОТЫ РЕЦИРКУЛЯЦИИ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКАХ РЕЦИРКУЛЯЦИОННОГО ТИПА

Приведены результаты исследования влияния на стабильность частоты рециркуляции режимов работы и конструктивных особенностей волоконно-оптического датчика на основе оптоэлектронной рециркуляционной системы, позволяющие разработать способы уменьшения погрешности и увеличения разрешающей способности таких измерителей.

A.A. KAVALENIA, A.V. POLYAKOV
Belarusian State University, Minsk

STUDY OF RECIRCULATION FREQUENCY STABILITY IN RECIRCULATION TYPE FIBER-OPTIC SENSORS

The results of a study of the influence of operating modes and design features of a fiber-optic sensor based on an optoelectronic recirculation system on the stability of the recirculation frequency are presented, allowing the development of methods for reducing errors and increasing the resolution of such measuring devices.

В настоящее время волоконно-оптические датчики (ВОД) прочно заняли свою нишу среди измерительных систем благодаря таким свойствам, как пожаробезопасность, стойкость к агрессивным средам, нечувствительность к электромагнитным помехам, возможность мультиплексирования в протяжённые измерители. Одним из новых направлений развития ВОД являются рециркуляционные датчики, в которых измерение осуществляется по изменению частоты рециркуляции одиночных оптических импульсов на разных длинах волн с их периодическим восстановлением по амплитуде, форме и длительности [1]. При этом оптическое волокно является одновременно чувствительным элементом и каналом передачи информации. Такие устройства могут, например, эффективно использоваться при определении дисперсионных параметров коротких отрезков многомодовых волоконных световодов [2].

Основными элементами рециркуляционных ВОД являются источник излучения, волоконно-оптическая линия задержки, фотоприёмное устройство, пороговое устройство и блок регенерации, замкнутые в

кольцо. Одним из главных факторов, влияющим на метрологические характеристики таких устройств, является стабильность частоты рециркуляции. Наиболее существенное влияние на точность и разрешающую способность оказывают совместные временные флуктуации процессов генерации и детектирования оптического излучения, а также моментов срабатывания порогового решающего устройства. Сложный характер влияния указанных факторов на стабильность частоты рециркуляции обусловил необходимость создания специального экспериментального стенда, включающего в себя макет оптоэлектронной рециркуляционной системы (ОЭРС) с необходимой измерительной аппаратурой. Установлено, что через 15 - 20 мин после запуска процесс рециркуляции переходит в установившийся режим и частота рециркуляции изменяется незначительно. Одним из традиционных способов повышения метрологических характеристик ВОД является увеличение времени измерений, в течение которого частотомером производится усреднение регистрируемых значений. Анализ экспериментальных зависимостей показал, что возрастающее отклонение величины относительной долговременной нестабильности (ОДН) частоты рециркуляции от линейного убывающего закона в сторону возрастания при увеличении времени измерения свидетельствует о том, что ВОД рециркуляционного типа обладают свойством накапливать флуктуации в процессе циркуляции. Это дает основание устанавливать время измерения в подобных ОЭРС не более, чем 1 с. С уменьшением длины волоконного световода стабильность частоты рециркуляции нелинейно уменьшалась, что связано с усилением влияния на процесс рециркуляции нестабильности параметров инжекционного лазера и лавинного фотодиода, приводивших к возрастанию скорости накопления ошибок. При этом максимальное значение ОДН не превышают $6 \cdot 10^{-6}$ и $2 \cdot 10^{-6}$ для длины кварцевого оптоволокна 50 м и более 100 м, соответственно, при условии, что значение порога срабатывания компаратора соответствует линейному участку фронта импульса. При проведении экспериментов пассивный метод термостабилизации осуществляли за счёт установки инжекционного полупроводникового лазера на медном теплоотводе.

Список литературы

1. Поляков А.В. Рециркуляционные оптоволоконные измерительные системы. Минск: БГУ, 2014.

2. Поляков А.В., Ксенофонтов М.А., Каваленя А.А. // Сбор. тр. 16 Межд. науч.-техн. конф. «Приборостроение–2023». 2023. С. 364–365.

Э.В. ГАРМАЕВА, Н.И. ГОРЛОВ
Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Новосибирск

ШУМЫ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКАХ НА ОСНОВЕ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА–БРИЛЛЮЭНА

В работе представлен анализ источников шумов в волоконно-оптических датчиках на основе обратного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна. При этом особое внимание уделено шумам, возникающим в процессе распространения сигналов в оптическом волокне.

E.V. GARMAEVA, N.I. GORLOV
Siberian State University of Telecommunications and Informatics, Novosibirsk

NOISE IN FIBER OPTIC SENSORS BASED ON BACKSCATTERING MANDELSTAM–BRILLOUIN

The report presents an analysis of noise sources in fiber-optic sensors based on Mandelstam–Brillouin backscattering. At the same time, special attention is paid to the noise that occurs during the propagation of signals in an optical fiber.

За последние годы был достигнут значительный прогресс в области волоконно-оптических датчиков на основе рассеяния Мандельштама–Бриллюэна. Хотя эта техника позволяет вводить высокую оптическую мощность зонда благодаря устойчивости конфигурации к нелокальным эффектам, окончательное ограничение накладывает параметр отношения сигнал/шум, который не может быть бесконечно улучшен за счёт увеличения отклика датчика. На этом этапе настало время проанализировать различные источники шума, чтобы разработать соответствующие алгоритмы расширения функциональных возможностей исследуемых датчиков.

Классическими источниками шума в исследуемых волоконно-оптических датчиках являются тепловой, дробовой и относительный шум интенсивности оптического излучателя. Эти источники шума были тщательно изучены из-за их важности в оптических системах связи [1] и, следовательно, их влияние на производительность датчика хорошо известно [2].

Шумы, возникающие в оптическом волокне, могут быть более интенсивными, чем рассмотренные выше. Распространение сигналов зондирования и рассеяния в противоположных направлениях является причиной возникновения эффекта двойного рэлеевского рассеяния, фундаментального источника шума в оптических системах связи. Двойное рэлеевское рассеяние соответствует многопутевой интерференции дважды рассеянного сигнала с исходным передаваемым сигналом, которая преобразует фазовый шум сигнала в шум интенсивности. Применительно к датчикам волна зондирующего сигнала распространяется по оптическому волокну, дважды подвергаясь рэлеевскому рассеянию [3].

Обычные датчики используют узкополосные волоконные брэгговские решётки. К сожалению, полоса отражения брэгговских решёток зависит от температуры, поэтому в условиях эксплуатации она может смещаться. Когда оптическая частота зонда лежит на склоне частотной характеристики, лазерный фазовый шум преобразуется в шум интенсивности. Амплитуда этого шума напрямую зависит от ширины линии лазерного источника и формы спектральной характеристики [4].

Представленные до сих пор источники шума учитывают только распространение зонда по системе. Тем не менее, когда импульсы накачки проходят в волокне, в оптическом волокне появляются другие новые источники шума. Одним из них может быть рэлеевское рассеяние, вызванное насосом. Однако его можно легко устранить с помощью подходящей оптической фильтрации. Более важными являются шумы, возникающие в результате преобразования фазового шума в шум интенсивности. Когда импульс накачки распространяется в волокне, в каждом месте генерируется спонтанное бриллюэновское рассеяние с частотой, зависящей от локального бриллюэновского сдвига частоты. Поскольку приёмный каскад настроен на обнаружение зонда, то на входе возникает шум биений, который зависит от полосы пропускания детектора и отстройки между смещением частоты зонда-насоса и центральной частотой спектра обратного рассеяния [5].

Список литературы

1. Agrawal G.P. Fiber-Optic Communication Systems. John Wiley & Sons, 2002.

2. Zornoza A., Sagues M., Loayssa A. // Journal of Lightwave Technology. 2012. V. 30(8). P. 1066-1072.

3. Wan P., Conradi J. // Journal of Lightwave Technology. 1996. V. 14 (3). P. 288-297.

4. Liu Q., Tokunaga T., He Z. // Optics Express. 2011. V. 19 (21). P. 20214-20223.

5. Zhou J., Chen J., Jaouen Y., Yi L., Li X., Petit H. Gallion P.A // IEEE Photonics Technology Letters, 2007. V. 19 (13). P. 978-980.

УДК 535(06)+004(06)

А.С. АБРАМОВ, В.А. ЛАПИН, П.П. МИРОНОВ
Ульяновский государственный университет

ДИНАМИКА КВАЗИНЕПРЕРЫВНОЙ ВОЛНЫ С СИЛЬНОЙ ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ В НЕОДНОРОДНОМ СВЕТОВОДЕ

Рассмотрена динамика излучения с сильной фазовой модуляцией в волоконном световоде с убывающим по модулю экспоненциальным профилем дисперсии групповых скоростей от длины. Показано, что параметры фазовой модуляции сильно влияют на пиковую мощность генерируемых импульсов.

A.S. ABRAMOV, V.A. LAPIN, P.P. MIRONOV
Ulyanovsk State University

DYNAMICS OF A QUASI-CONTINUOUS WAVE WITH STRONG PHASE MODULATION IN INHOMOGENEOUS FIBER

The dynamics of radiation with strong phase modulation in a fiber optic fiber with a modulo decreasing exponential profile of the dispersion of group velocities from length is considered. It is shown that the phase modulation parameters strongly affect the peak power of the generated pulses.

В условиях самосинхронизированного взаимодействия ЭМ волны, распространяющейся вдоль поверхности цилиндра-модулятора с ВПЗ, реализуется глубокая фазовая модуляция введённого излучения. В этом случае, соотношение выражение для амплитуды излучения на выходе из световода-модулятора:

$$A_s(z=l,t) \approx \sqrt{P_n}\left[1+\delta_a \cos(\Omega_a t)\right]\exp\left[-i\delta\cos(\Omega t)\right]. \quad (1)$$

Динамика временной огибающей ВП описывается уравнением для амплитуды огибающей вида НУШ [1, 2]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} - i\frac{d_2(z)}{2}\frac{\partial^2 A}{\partial \tau^2} + iR|A|^2 A = 0, \quad (2)$$

где $\tau = t - z/v_g$ – время в бегущей системе координат, $d_2 = \left(d^2\beta/d\omega^2\right)$ – параметр дисперсии групповых скоростей, R – параметр нелинейности. При этом в работе выбиралась зависимость дисперсии вида:

$$d_2(z) = -|d_{20}|\exp[-bz]\ . \quad (3)$$

На рис. 1 приводятся результаты численного моделирования распространения модулированной волны путем численного решения уравнения (2) SSFM[1]. При этом для моделирования в работе были выбраны параметры: мощность модулированной волны $P_n = 1$ Вт, начальное значение дисперсии световода $d_{20} = -10^{-26}$ с^2/м, параметр неоднородности ДГС $b = \frac{1}{2L}\ln(10) = \frac{1}{1000}\ln(10) \approx 2.31\cdot10^{-3}$ м$^{-1}$, параметр керровской нелинейности $R = 10^{-3}$ (Вт×м)–1, $\delta_a = 0.01$ и $\Omega_a = \sqrt{2RP_n / |d_{20}|}$ – глубина и частота амплитудной модуляции, $\delta = 1$. $\Omega_p = (0.6;3;6)\cdot10^{12}$ с$^{-1}$ – кривые (1–3) (a) и $\delta = 1;3;5$. $\Omega_p = 0.6\cdot10^{12}$ с$^{-1}$ – кривые (1–3) (b).

Видно, что с увеличением амплитуды или частоты фазовой модуляции значительно растёт пиковая мощность генерируемых последовательностей импульсов, при этом этот рост быстро со временем сменяется убылью, что показывает возможность подбора оптимальных для использования данного эффекта для генерации последовательностей ультракоротких импульсов параметров.

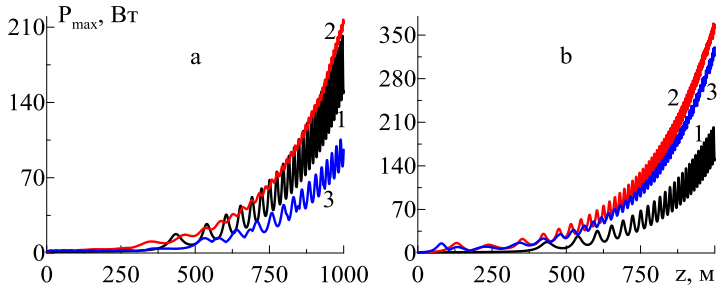


Рис. 1. Зависимости пиковой мощности при значениях $\delta = 1$ и $\Omega_p = (0.6;3;6)\cdot10^{12}$ с$^{-1}$ – кривые (1 - 3) (a);
$\delta = 1;3;5$ и $\Omega_p = 0.6\cdot10^{12}$ с$^{-1}$– кривые (1 - 3) (b)

Работа выполнена при поддержке РНФ в рамках научного проекта № 23-22-00412.

Список литературы

1. Zolotovskii I.O., Lapin V.A., Sementsov D.I., Fotiadi A.A., Popov S.V. // Optics Communications. 2018. V. 426. P. 333-340.

2. Abramov A.S., Zolotovskii I.O., Lapin V.A., Mironov P.P., Yavtushenko M.S., Svetukhin V. V., Fotiadi A.A. // Photonics. 2022. V. 9 (3). P. 160.

УДК 535(06)+004(06)

К.Д. ЛЯХОМСКАЯ, Л.Ю. НАДЬКИН
Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко, Тирасполь

ВЛИЯНИЕ ПОСТОЯННОЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НА ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В ДВУМЕРНОМ PT-СИММЕТРИЧНОМ МАССИВЕ СВЕТОВОДОВ

Исследованы особенности распространения лазерного излучения в PT-симметричном двумерном массиве световодов с периодически меняющейся постоянной распространения. Показано, что пространственные профили интенсивности излучения характеризуются периодическим режимом с возможным усилением излучения в ряде световодов массива в зависимости от значений коэффициента связи, постоянной распространения и коэффициента поглощения (усиления).

K.D. LIAKHOMSKAIA, L.Yu. NAD'KIN
Transnistrian State University named after T.G. Shevchenko, Tiraspol

INFLUENCE OF THE PROPAGATION CONSTANT ON THE FEATURES OF RADIATION PROPAGATION IN A TWO-DIMENSIONAL PT - SYMMETRIC WAVEGUIDE ARRAY

The characteristics of laser radiation propagation in a PT-symmetric two-dimensional waveguide array with periodically varying propagation constants have been studied. It has been shown that the spatial intensity profiles of the radiation exhibit a periodic regime, with possible radiation enhancement in some waveguides of the array, depending on the values of the coupling coefficient, the propagation constant, and the absorption (gain) coefficient.

Современные задачи интегральной фотоники связаны с исследованием возможностей управления поведением распространяющегося лазерного излучения в различных периодических системах, в таких как фотонные решётки или массивы световодов [1, 2]. В [3] для пилообразной фотонной решётки экспериментально установлена возможность локализации энергии в режиме малой мощности, то есть в отсутствие нелинейностей. В [4] показано, что поведение излучения в связанных волноводных решётках со сбалансированными усилением и потерями становится чрезвычайно чувствительным к малым изменениям начальных условий или параметров системы.

В данной работе получены аналитические решения системы дифференциальных уравнений для амплитуд полей распространяющихся волн в PT-симметричном массиве из двух бесконечных цепочек световодов (рис. 1), характеризующихся периодическим характером изменения постоянной распространения β.

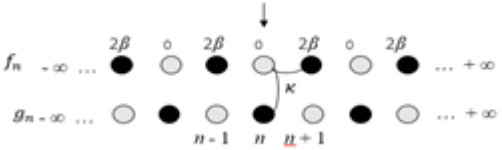
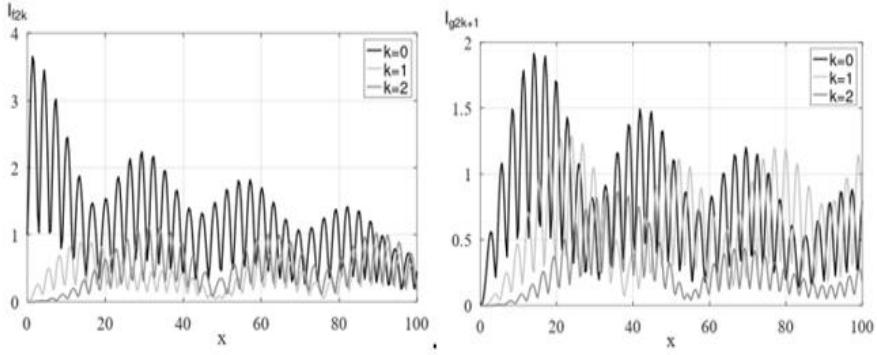


Рис. 1. Схема задачи

Показано, что пространственные профили излучения, несмотря на наличие усиления (поглощения) в системе, характеризуются только колебательным режимом, который может сопровождаться усилением излучения в накачиваемом или ряде других световодов массива при определенных значениях коэффициента связи световодов, постоянной распространения и коэффициента усиления (поглощения) (рис. 2).



а *б*

Рис. 2. Пространственные профили интенсивности распространяющегося излучения в первых трёх чётных f (*а*) и нечётных световодах g (*б*) цепочек массива при $\kappa = 0.25$; $\gamma = 5$; $\beta = 4$

Список литературы

1. Lu L., Joannopoulos J.D., Soljac̆icr M. //arXiv:1408.6730 v2 [physics.optics]. 2014.
2. Bender C.M., Boettcher S. // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 80. P. 5243.
3. Weimann S., Szameit A., Morales-Inostroza L., Real B., Cantillano C., Vicencio R.A. Transport in Sawtooth photonic lattices // arXiv:1604.04147v1 [physics.optics]. 2016.
4. Longhi S. // Optics Letters. 2018. V. 43. No. 12.

УДК 535(06)+004(06)

М.М. ВЕКШИН, О.А. КУЛИШ
Кубанский государственный университет, Краснодар

РАЗРАБОТКА ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКОГО ТРЁХКАНАЛЬНОГО МОДОВОГО МУЛЬТИПЛЕКСОРА НА ОСНОВЕ ЭЛЕМЕНТОВ НАПРАВЛЕННОЙ СВЯЗИ В СТЕКЛЕ

Разработан интегрально-оптический трёхканальный мультиплексор волноводных мод TE_0, TE_1 и TE_2 на основе направленных ответвителей. Разработка проведена для технологии формирования оптических волноводов методом термического ионного обмена в стекле.

M.M. VEKSHIN, O.A. CULISH
Kuban State University, Krasnodar

DESIGN OF INTEGRATED-OPTIC 3-CHANNEL MODE MULTIPLEXER BASED ON DIRECTIONAL COUPLERS IN GLASS

The integrated-optic 3-channel multiplexer for TE_0-, $TE1_1$- and TE_2-modes, based on directional couplers, has been designed. The multiplexer design has been made for optical waveguide fabrication technology by thermal ion exchange in glass.

Большую актуальность в настоящее время представляют исследования новых методов уплотнения каналов для ВОЛС [1]. Цель работы состоит в разработке интегрально-оптического модового мультиплексора (демультиплексора) мод TE_0, TE_1 и TE_2 на основе направленных ответвителей в стекле. На рис. 1 представлена схема модового мультиплексора.



Рис. 1. Схематический вид волноводной структуры интегрально-оптического модового мультиплексора на основе направленных ответвителей

Принцип работы схемы основан на связи волноводных мод в направленных ответвителях. Для создания модового мультиплексора использована технология изготовления элементов интегральной оптики методом ионного обмена $K^+ \leftrightarrow Na^+$ в стекле К-8. Путем комбинированного решения уравнения для ионного обмена и волнового уравнения, определяющих характеристики мод волноводов ответвителей, установлены параметры, необходимые для изготовления мультиплексора, функционирующего на длине волны 0.85 мкм.

Параметры w_1, w_2 и w_3 на схеме обозначают размеры щели в маске для изготовления волноводов, их значения равны 18,4, 4,2 и 11,2 мкм, соответственно. Общая длина схемы с подобранными длинами связи в ответвителях для реализации функции разделения мод составляет 10 мм.

На рис. 2 показаны картины распространения моды TE_1 и моды TE_2 в мультиплексоре. Расчёт выполнен методом распространяющегося пучка.

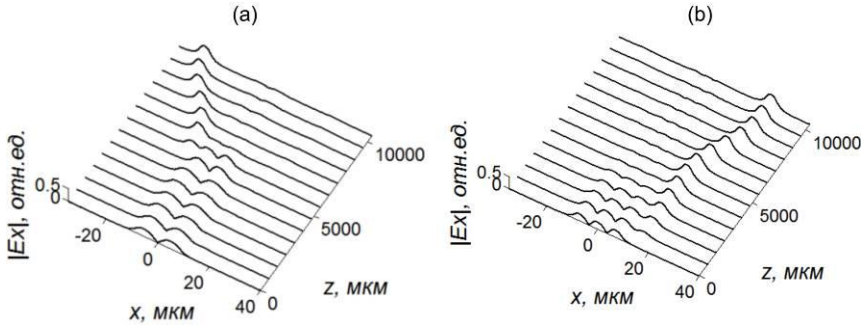


Рис. 2. Картина распространения мод TE_1 (a) и TE_2 (b) в модовом мультиплексоре

Как видно из графиков, волноводная структура выполняет функцию демультиплексора. Моды TE_1 и TE_2 на входе схемы разделяются по различным выходным каналам, при этом они трансформируются в моду TE_0. Мода TE_0 выделяется в центральный выходной канал. Согласно расчётам вносимые потери составляют 0,2 дБ (без учёта технологических потерь при изготовлении волноводов схемы и потерь на стыковку с волоконными световодами), коэффициент изоляции составляет 22 дБ.

Список литературы

1. Du J., Shen W., et. al. // Chinese Optics Letters. 2021.V. 19 (9), P. 091301.

УДК 535(06)+004(06)

И.Д. МЕДВЕДЕВ, А.В. КУЗНЕЦОВ, А.С. ШАЛИН
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

ИСКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ТОЧКИ В ФОТОННОЙ МЕТАПОВЕРХНОСТИ С НАРУШЕНИЕМ СИММЕТРИИ ТОЛЬКО В ПЛОСКОСТИ

В данной работе предложена новая геометрия для исследования исключительной точки в структуре из двух кремниевых параллелепипедов на стеклянной подложке, что упрощает экспериментальный процесс настройки и наблюдения. Основные результаты демонстрируют резонансы в спектре отражения на длине волны около 850 нм, что подтверждает перспективность такой структуры для сенсорных приложений.

I.D. MEDVEDEV, A.V. KUZNETSOV, A.S. SHALIN
Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

EXCEPTIONAL POINTS IN A PHOTONIC METASURFACE WITH SYMMETRY BREAKING ONLY IN THE PLANE

In this paper, a new geometry is proposed to investigate an exceptional point in a structure of two silicon parallelepipeds on glass, which simplifies the experimental setup and observation process. The main results show resonances in the reflection spectrum at a wavelength around 850 nm, which confirms the promising potential of such a structure for sensing applications.

Неэрмитовы системы (иными словами, открытые системы) в нынешнее время заслуживают особого внимания из-за их возможности поддерживать исключительные точки (ИТ) [1]. Этот эффект возникает тогда, когда совпадают как собственные значения, так и собственные состояния исследуемой системы. Основная особенность этого явления – внезапное увеличение чувствительности системы к малым изменениям характеристик окружающей среды. В качестве одной из таких характеристик может выступать, например, показатель преломления [1 - 3]. В последнее время было проведено много исследований различных геометрических структур для наблюдения и управления исключительными точками [1 - 4]. Однако нередки случаи, когда экспериментально сложно контролировать и настраивать такую систему.

Поэтому, мы предлагаем новую геометрию для исследования исключительной точки: два кремниевых параллелепипеда на стеклянной подложке с изменяющимся углом между ними (рис. 1a). Основным результатом исследования является то, на спектре отражения метаповерхности, настроенной в ИТ (рис. 1b) наблюдаются резонансы вблизи длины волны 850 нм, что позволяет использовать данную структуру в сенсорных приложениях. Отметим, что данный результат коррелирует с результатами расчёта в программе COMSOL Multiphysics мультипольной декомпозиции этой системы. В дополнение, было исследовано влияние возмущений геометрии на вид спектра отражения (рис. 1c, d) – как можно заметить, эффект проявляется хуже, чем в геометрии, настроенной на исключительную точку.

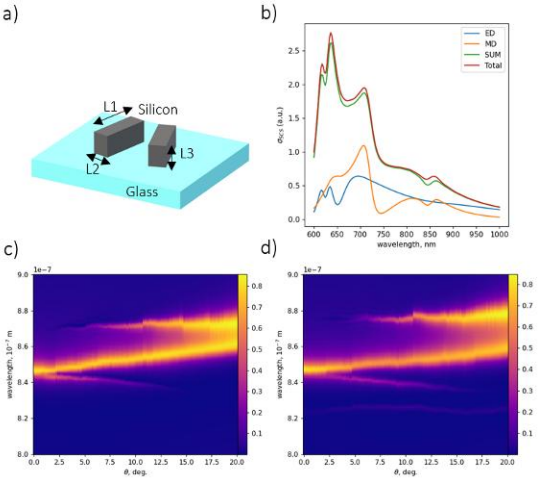


Рис. 1. Исключительная точка в диэлектрической метаповерхности системы двух параллелепипедов: элементарный домен исследуемой системы (a); мультипольная декомпозиция исследуемого изолированного домена (b); численно моделированные спектры отражения метаповерхности в ИТ (c) и с возмущёнными параметрами (d)

Список литературы

1. Wiersig J // Photonics Res. 2020. V, 8, P, 1457.

2. Canós Valero A., et al. // Phys Rev Res. 2024. V. 6. P. 013053.

3. Medvedev I.D., Kuznetsov A.V., Bobrovs V. // Lecture Notes in Networks and Systems. 2024. V. 1126.

4. Kuznetsov A.V., Medvedev I.D., Bobrovs V. // Lecture Notes in Networks and Systems. 2024. V. 1126.

УДК 535(06)+004(06)

М.В. САВЕЛЬЕВ, А.П. ЯЛОВ
Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева

ЧЕТЫРЁХВОЛНОВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В СУСПЕНЗИИ ПРИ СРАВНИМЫХ ВКЛАДАХ ТЕМПЕРАТУРНОЙ И КОНЦЕНТРАЦИОННОЙ РЕШЁТОК

Для водной суспензии наночастиц приведены результаты численного анализа пространственной селективности четырёхволнового преобразователя излучения в зависимости от отношения вкладов температурной и концентрационной решёток.

M.V. SAVELYEV, A.P. YALOV
Samara National Research University

FOUR-WAVE MIXING IN A SUSPENSION WITH COMPARABLE CONTRIBUTIONS OF TEMPERATURE AND CONCENTRATION GRATINGS

The results of the numerical analysis of the spatial selectivity of a four-wave radiation converter are presented for an aqueous suspension of nanoparticles depending on the ratio of the contributions of the temperature and concentration gratings.

В последние годы в задачах микроскопии наночастиц, живых клеток и их компонент активно применяются четырёхволновые преобразователи излучения (ЧПИ) [1 - 3]. В связи с этим вопрос о точности восстанавливаемых ЧПИ изображений является, безусловно, актуальным. В работе [4] для прозрачной суспензии показана возможность управления размером неоднородностей, которые могут быть скомпенсированы ЧПИ, путём изменения относительного вклада в нелинейный показатель преломления температурной и концентрационной решёток. Однако в [4] не были учтены вклады в полный поток частиц электрострикционного потока и потока силы тяжести, что согласно [5] влияет на селективность ЧПИ в области низких частот амплитуды A_4 пространственного спектра объектной волны (ПСОВ).

Целью работы является анализ пространственной селективности ЧПИ в зависимости от силы тяжести, действующей на наночастицы суспензии, и относительного вклада температурной и концентрационной решёток.

С учётом приближений, приведённых в работе [5], было получено аналитическое выражение для ПСОВ в прозрачной суспензии. Введены

параметры M и u, характеризующие силу тяжести, действующую на наночастицы суспензии, и относительный вклад температурной и концентрационной решёток в ПСОВ. На рис. 1 для водной суспензии толщиной 1 мм, облучаемой пучками на длине волны 532 нм, представлены зависимости модуля ПСОВ, нормированного на его постоянное значение ($A_{C\max}$), наблюдающегося на высоких пространственных частотах $\kappa \to 0{,}1k$ (где k – волновое число) при доминирующем вкладе концентрационной решётки в ПСОВ ($u \to 0$). Видно, что постоянное значение модуля ПСОВ с ростом параметра u уменьшается по закону $|1 - u|$, также в области низких пространственных частот возникает максимум, видность которого с ростом u увеличивается, а положение смещается ближе к частоте $\kappa = 0$.

Пространственная селективность ЧПИ может быть описана полушириной провала ($\Delta\kappa$) в модуле A_4, определяемой по уровню ½ от наибольшего значения [6]. Анализ показывает монотонное уменьшение $\Delta\kappa$ с ростом параметра u. Также уменьшение $\Delta\kappa$ наблюдается с убыванием величины M, что коррелирует с результатами работы [5]. Тем самым вариация параметра u за счёт входящей в него концентрации наночастиц позволяет управлять пространственной селективностью ЧПИ в прозрачных суспензиях.

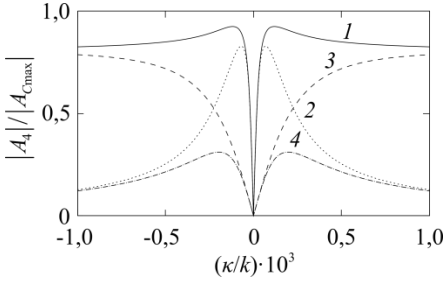


Рис. 1. Модули ПСОВ при толщине водной суспензии 1 мм, длине волны 532 нм, u = 0,2 (1, 3), 1 (2, 4) M = 0,5 (1, 2), 5 (2, 4)

Список литературы

1. Pope I., et al. // Appl. Phys. Lett. 2023. V. 122. P. 153701.
2. Pope I., et al. // Light Sci. Appl. 2023. V. 12. P. 80.
3. Giannakopoulou N., et al. // Nanoscale. 2020. V. 12. P. 4622.
4. Савельев М.В., Ивахник В.В. // X Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2021. С. 137-138.
5. Savelyev M.V., Aleferkina K.E. // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2024. V. 88 (6). P. 874.
6. Ивахник В.В., Савельев М.В. // Компьютерная оптика. 2018. Т. 42. № 2. С. 227.

УДК 535(06)+004(06)

В.Н. ЧУКОВ
Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН, Москва

МЕТА-СПЕКТРОСКОПИИ РЭЛЕЯ И ЛАУЭ–БРЭГГА–ВУЛЬФА ПРИ РАССЕЯНИИ ПОВЕРХНОСТНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ РЭЛЕЯ НА ТОПОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЁТКАХ ШЕРОХОВАТОСТИ

Теоретически получены новые топологические решётки шероховатости. Каждая из них комбинированно реализует новые топологические законы для длинно- и коротковолнового рассеяния. С их помощью установлены новые возможности моделирования спектра рассеяния рэлеевской волны посредством новых мета-спектроскопий Рэлея и Лауэ–Брэгга–Вульфа во всём диапазоне частот.

V.N. CHUKOV
N.M. Emanuel Institute of Biochemical Physics of the RAS, Moscow

THE RAYLEIGH AND LAUE–BRAGG–WULFF META-SPECTROSCOPY FOR THE RAYLEIGH SURFACE ACOUSTIC WAVE SCATTERING ON TOPOLOGICAL LATTICES OF A ROUGHNESS

Topological lattices of a roughness are constructed theoretically. Each of them realizes the new topological laws both of the long- and short- wavelength scattering. The new possibilities of the Rayleigh wave scattering spectrum modeling by means of the new Rayleigh and the Laue–Bragg–Wulf meta-spectroscopy are obtained in all the frequency range using these topological lattices.

Задача рассеяния [1 - 3] поверхностной акустической волны Рэлея решена в приближении Рэлея–Борна теории возмущений по амплитуде шероховатости для трёхмерной детерминированной (нестатистической [4, 5]) цилиндрической шероховатости [6, 7], имеющей пространственную статистическую симметрию произвольного порядка и содержащей решётку разрывов. Указанная симметрия определяется занулением пространственных моментов финитной шероховатости, то есть отличной от нуля в области конечного размера, изотропного твёрдого тела. Данные пространственные моменты являются топологическими характеристиками для новых топологических законов рэлеевского предела рассеяния [6, 7]. Наименьший порядок производной шероховатости, отличной от нуля хотя

бы в одной точке её разрыва, включая конечную точку, является топологической характеристикой множеств шероховатости разной формы для новых топологических законов в пределе рассеяния Лауэ–Брэгга–Вульфа [8]. Обнаружено, что интенсивность рассеянной волны Рэлея сильно зависит от топологических характеристик во всей области длин волн λ: от много больших (рэлеевский предел) до много меньших (предел Лауэ–Брэгга–Вульфа) радиуса шероховатого участка $\boldsymbol{d}$. Этот результат позволяет моделировать спектр рассеяния волны Рэлея. Например, число наибольших максимумов в заданной наперёд области спектра по $\boldsymbol{d/\lambda}$ зависит не от числа разрывов шероховатости или её острых пиков, а от топологических характеристик в соответствии с новыми топологическими законами рассеяния [9]. Получено, что топологические законы длинно- и коротковолнового рассеяния могут быть использованы для формирования спектра рассеяния в широкой области длин волн посредством новых мета-спектроскопий Рэлея и Лауэ–Брэгга–-Вульфа [6 - 11].

Работа выполнена как часть Государственного задания НИОКТР № 122041400112-8, код темы FFZR-2022-0012.

Список литературы

1. Rayleigh L. The Theory of Sound. New York: Dover, 1945.

2. Laue M., Friedrich W., Knipping P. in X-Ray and Neutron Diffraction /ed. by G.E. Bacon. Pergamon Press, 1966. P. 253.

3. Early Papers on Diffraction of X-Rays by Crystals. V. I. Springer, 1969; V. II, Springer, 1972.

4. Chukov V.N. // Ultrasonics. 2012. V. 52 (1). P. 5.

5. Chukov V.N. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2024. V. 88 (2). P. 244.

6. Chukov V.N. Surface roughness structure and Rayleigh scattering laws of Rayleigh wave. Preprint. IBCP RAS, Moscow 2003.

7. Chukov V.N. On violation of Rayleigh and Bragg laws of scattering // Proc. of the Int. Conf. “Days on Diffraction 2011”. Saint-Petersburg, 2011, P. 55.

8. Чуков В.Н. Новые законы диффузного рассеяния волны Рэлея и нарушение закона Лауэ–Брэгга–Вульфа. Препринт ИБХФ им. Н.М. Эмануэля РАН, Инфра-М: “Паблит”, 2023.

9. Chukov V.N. Meta-Rayleigh and topological diffuse scattering of the Rayleigh wave on Deterministic cylindrical roughness with spatial statistical symmetry of an arbitrary order. Preprint IBCP RAS. Moscow: “Publit”, 2024.

10. Chukov V.N. // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 2103. P. 012157.

11. Chukov V.N.// Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2023. Т. 16. № 1.2. С. 557.

УДК 535(06)+004(06)

О.В. КОРОВАЙ, Д.А. МАРКОВ
Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко, Тирасполь

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ В ФОТОННОЙ РОМБИЧЕСКОЙ РЕШЁТКЕ

Используя метод связанных мод, теоретически изучены эффекты распространения лазерного излучения в оптической ромбической решётке, состоящей из трёх параллельных массивов волноводов с учётом взаимодействия каждого волновода с ближайшими соседями и между волноводами массивов. Получены аналитические выражения, позволяющие точно предсказать возникновение эффекта локализации света, в зависимости от констант связи. При некоторых значениях параметров в оптической решётке наблюдается эффект локализации Андерсона.

O.V. KOROVAI, D.A. MARKOV
Transnistrian State University named after T.G. Shevchenko, Tiraspol

ELECTROMAGNETIC WAVES IN PHOTONIC RHOMBIC LATTICE

Using the coupled mode method, the effects of laser radiation propagation in an optical rhombic lattice consisting of three parallel waveguide arrays are theoretically studied, taking into account the interaction of each waveguide with its nearest neighbors and between the waveguides of the arrays. Analytical expressions are obtained that allow one to accurately predict the occurrence of the light localization effect, depending on the coupling constants. At some parameter values, the Anderson localization effect is observed in the optical lattice.

В последние годы успехи в теоретических и экспериментальных исследованиях возможности разработки полностью оптических элементов, стимулировали изучение свойств различных дискретных систем. Фотонная решётка демонстрирует многозонный спектр линейных возбуждений, что приводит к усложнению волновых процессов и появлению в спектре фотонов дополнительной плоской зоны (Flat band), позволяя управлять светом, которое является хрупким и неустойчивым и демонстрирует чувствительность, что приводит к множеству квантовых и классических явлений [1, 2]. С другой стороны, в неупорядоченных решётках наблюдается – локализация Андерсона [3].

Целью работы является теоретическое исследование эволюции света, распространяющегося в ортогональном направлении поперечной

периодической структуре, в квазиодномерной ромбической фотонной решётке (рис. 1).

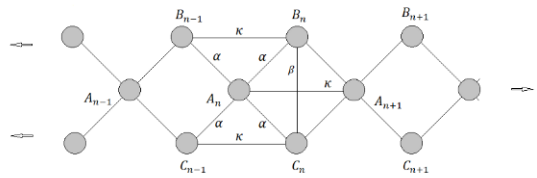
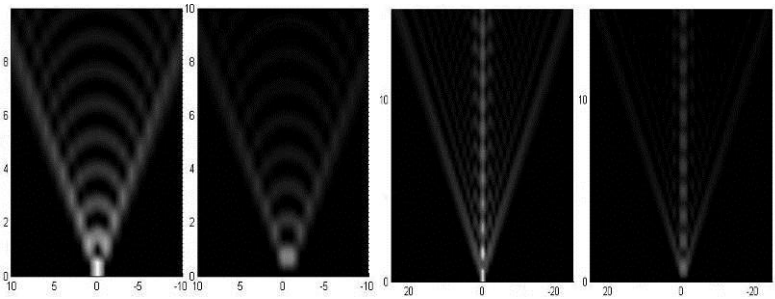


Рис. 1. Схема расположения волноводов квазиодномерного ромбического массива

Пространственное распределение интенсивности при условии накачки только в торец нулевого волновода A_0 при малых β, κ и достаточно большом α представляет собой (рис. 2) последовательность максимумов, разделенных нулями. При некоторых значениях констант связи, то есть при наличии квантовой интерференции между распространяющимся излучением наблюдается эффект локализации Андерсона в решётке.



а *б*

Рис. 2. Пространственное распределение интенсивности света в первом и втором массивах решётки в зависимости от координаты x при различных значениях констант при накачке в торец A_0: α = 0.9, β = 0.01, κ = 0.01 (*а*), α = 0.8, β = 0, κ = 0.4 (*б*)

Ромбическая волноводная решётка обладает дисперсионными и линейными локализованными волнами, распространяющимися либо в режиме баллистического переноса, либо в режиме идеального локализованного профиля, обусловленными учтенными взаимодействиями в решётке и вариацией значений констант связи.

Список литературы

1. Leykam D. // AAPPS Bull. 2024. V. 34. No. 2. P. 1-8.
2. Vicencio R.A. // Advances in Physics: X. 2021. V. 6. No. 1. P. 1-42.
3. Schwartz T., Bartal G., Fishman S., Segev M. // Nature. 2007. V. 446. No. 52. P. 52-55.

УДК 535(06)+004(06)

С.С. ШМОЙЛОВА, А.Р. БАГРОВ, В.В. ИВАХНИК
Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева

ЧЕТЫРЁХВОЛНОВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ТЕПЛОВОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ В СХЕМЕ СО ВСТРЕЧНЫМИ ПУЧКАМИ

Рассматривается четырёхволновое взаимодействие на тепловой нелинейности. Проведено численное моделирование коэффициента отражения четырёхволнового преобразователя излучения при учёте записи в нелинейной среде температурных решёток, образованных во встречных пучках. Проанализирована зависимость коэффициента отражения от характеристик нелинейной среды и интенсивности волн накачки. Результаты показали, что увеличение интенсивности волн накачки приводит к увеличению коэффициенту отражения.

S.S. SHMOILOVA, A.R. BAGROV, V.V. IVAKHNIK
Samara National Research University

FOUR-WAVE INTERACTION WITH THERMAL NONLINEARITY IN A SCHEME WITH COUNTER BEAMS

Four-wave interaction on thermal nonlinearity is considered. Numerical modeling of the reflection coefficient of a four-wave radiation converter is performed taking into account the recording of temperature gratings formed in counter beams in a nonlinear medium. The dependence of the reflection coefficient on the characteristics of the nonlinear medium and the intensity of pump waves is analyzed. The results show that an increase in the intensity of pump waves leads to an increase in the reflection coefficient.

Исследование четырёхволнового взаимодействия в средах с различным типом нелинейности традиционно используется для получения волны с обращённым волновым фронтом (ОВФ) в реальном масштабе времени. Четырёхволновое взаимодействие нашло широкое применение для коррекции фазовых искажений [1], для обработки изображений [2], для получения связанных фотонов и т.д.

Одной из перспективных сред для реализации четырёхволнового взаимодействия в среднем ИК-диапазоне длин волн является среда с тепловой нелинейностью [3].

Во всех существующих работах учитывались температурные решётки, записанные в попутных пучках (схема Лейта-Упатниекса) [4], и не учитывались решётки, записанные во встречных пучках (схема

Денисюка). Поэтому представляет интерес изучение четырёхволнового преобразователя с учётом температурных решёток, записанных во встречных пучках.

Целью работы является изучение коэффициента отражения четырёхволнового преобразователя излучения при учёте записи в нелинейной среде температурных решёток, образованных во встречных пучках.

При малом коэффициенте отражения проанализировано отношение амплитуд объектной волны, при наличии решёток записанных в попутных и во встречных пучках. Получена и проанализирована система связных дифференциальных уравнений третьего порядка, учитывающая решётки, записанные во встречных пучках. Получены зависимости коэффициента отражения от нормированной интенсивности волн накачки. Показано, что при фиксированном нормированном коэффициенте поглощения увеличение нормированной длины волны взаимодействующих волн приводит к увеличению модуля амплитуды объектной волны. Увеличение нормированного коэффициента поглощения приводит к выпрямлению графика зависимости амплитудного коэффициента отражения от нормированной интенсивности волн накачек.

Список литературы

1. Voronin E.S., Petnikova V.M., Shuvalov V.V. // Quantum Electronics. 1981. V. 8 (5). P. 917-935.

2. Gheen G., et al. // Applied Physics Letters. 1987. V. 51 (19). P. 1481-1415.

3. Ivakhnik V.V., Korobtsova T.G., Neganova E.V. // Physics of wave processes and radio engineering systems. 2011. V. 14 (1). P. 16-20.

4. Ivakhnik V.V., Nikonov V.I., Kharskaya T.G. // Computer optics. 2006. V. 30. P. 4-8.

УДК 535(06)+004(06)

О.В. МИНИН[1], И.В. МИНИН[1,2]
[1]*Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск*
[2]*Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники – филиал Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск*

КОНЦЕПЦИЯ ОПОРНОЙ ФАЗЫ СОРЕ-МИНИН-ВЕББ В ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ

Продемонстрировано, что задача синтеза дифракционного элемента не имеет единственного решения. Концепция опорной фазы Соре-Минина-Вебб со времён изобретения зонной пластины не рассматривалась во всех учебниках по оптике. Тем не менее, выбором опорной фазы возможно существенно корректировать распределение интенсивности и фазы поля в области локализации падающего излучения. Практическое применение опорной фазы нашло в дифракционных антеннах, оптических элементах различного типа, включая ахроматические, в микроскопах со субдифракционным разрешением и суперосцилляционных линзах.

O.V. MININ[1], I.V. MININ[1,2]
[1]*Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk*
[2]*Technological Design Institute of Applied microelectronics –Branch of Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of Siserian Branch of the RAS, Novosibirsk*

THE CONCEPT OF THE SORET-MININ-WEBB REFERENCE PHASE IN DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS

It is demonstrated that the problem of synthesis of a diffractive element does not have a unique solution. The concept of the Soret-Minin-Webb reference phase has not been considered in any textbooks on optics since the invention of the zone plate. Nevertheless, by choosing the reference phase it is possible to significantly correct the distribution of the intensity and phase of the field in the region of localization of the incident radiation. The practical application of the reference phase has found in diffraction antennas, optical elements of various types, including achromatic ones, in microscopes with subdiffraction resolution and superoscillatory lenses.

Планарные дифракционные оптические элементы, в том числе зонные пластины (ЗП) [1], демонстрируют уникальные возможности фокусировки во всем электромагнитном спектре от рентгеновского и ультрафиолетового диапазона до видимого, инфракрасного и терагерцового. Во втором дополнении к “мемуару о дифракции” Френель сформулировал так называемую концепцию «зон Френеля» [2].

В тоже время, Френель, определяя зоны конструктивной и деструктивной интерференции излучения, для упрощения анализа, присвоил начальной фазе (или опорной фазе) значение равное нулю. Позднее, Соре при демонстрации зонной пластины указывал, что размер первой зоны может быть произвольным [3]. При этом, однако, был сделан тот же выбор значения начальной фазы, равной нулю, что и у Френеля. Это же приближение (нулевая начальная фаза) было принято во всех классических учебниках по оптике, фотонике, включая рентгеновский диапазон, например, [4 - 6].

Но так ли всё просто? В 1988 году нами впервые было показано, что так называемый опорный радиус (произвольный размер первой зоны Френеля) является свободным параметром, выбором которого возможно регулировать распределение интенсивности поля в области фокусировки [7, 8]. Более того, по словам М. Берри результаты [8] вплотную приблизились к реализации эффекта суперосцилляций [9], хотя сам эффект не упоминался.

Независимо, через 15 лет Д. Вебб показал, что введение опорной фазы эквивалентно опорному радиусу и позволяет оптимизировать их фокусирующие свойства [10]. С этого времени значительные успехи были достигнуты в оптимизации фокусирующих свойств классических и спиральных зонных пластин (формирование оптических вихрей, обратного потока энергии, трапинга наночастиц), ахроматических дифракционных элементов с учётом эффекта суперосцилляций, дифракционных оптики для фокусировки излучения в произвольную плоскую кривую, дифракционных антенн и их применения в различных областях науки и техники, включая микроскопию субдифракционного предела, на основе концепции опорной фазы.

Список литературы

1. Raisky S.M. // UFN. 1952. V. 47 (4). P. 516-536.
2. Fresnel A. // Oeuvres completes d' Augustin Fresnel. 1866. V. 1 (1). P. 365.
3. Soret J. // Annalen der Physik. 1875. V. 232 (9). P. 99-113.
4. Born M,, Wolf E. Principles of Optics. New York: Pergarnon Press, 1980.
5. Jenkins F.A., White H.E. Fundamentals of Optics. New York: McGraw-Hill Book Company Inc., 1957.
6. Saleh B.E., Teich M.C. Fundamentals of Photonics, 2nd ed. New York: Wiley, 2007.
7. Минин И.В., Минин О.В. // Авторское свидетельство на изобретение SU1617398A1 от 26.09.1988, опубл. БИ 48, 1990.
8. Minin I.V., Minin O.V. // Sov. J. Quantum Electron. 1990. V. 20. P. 198.
9. Berry M. // Private communication. January 31, 2024.
10. Minin I.V., Minin O.V., Webb G. // Proc. of 18th Int. Conf. on ICECOM 2005. 2005. P. 1-4.

УДК 535(06)+004(06)

Н.И. ПЕТРОВ, Ю.М. СОКОЛОВ, В.В. СТОЯКИН,
В.А. ДАНИЛОВ, В.В. ПОПОВ[1], Б.А. УСИЕВИЧ[2]
Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва
[1]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
[2]Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

ФОТОННЫЙ СПИНОВЫЙ ЭФФЕКТ ХОЛЛА В СУБВОЛНОВЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЁТКАХ

Продемонстрирован продольный фотонный спиновый эффект Холла (ФСЭХ), проявляющийся в угловом расщеплении циркулярно-поляризованных фотонов с противоположными знаками спиральности. Мы теоретически и экспериментально демонстрируем, что угловые сдвиги в плоскости падения могут быть изменены со спин-независимых (сдвиг Гуса–Хенкен) на спин-зависимые (ФСЭХ) при изменении состояния поляризации падающего пучка.

N.I. PETROV, Yu.M. SOKOLOV, V.V. STOIAKIN,
V.A. DANILOV, V.V. POPOV[1], B.A. USIEVICH[2]
Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of RAS, Moscow
[1]Lomonosov Moscow State University
[2]Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

PHOTONIC SPIN HALL EFFECT IN SUBWAVELENGTH DIFFRACTION GRATINGS

An enhanced in-plane photonic spin Hall effect manifested in the angular splitting of circularly polarized photons with opposite helicity signs is demonstrated. We theoretically and experimentally demonstrate that angular in-plane shifts can be changed from spin-independent (Goos–Hänchen shift) to spin-dependent (PSHE) when the incident beam polarization state changes.

Обычно фотонный спиновый эффект Холла (ФСЭХ), а также сдвиг Имберта–Федорова [1, 2] связаны с пространственным и угловым разделением фотонов с противоположными спиновыми моментами. Для фотонов, проходящих через границу раздела воздух–стекло, наблюдались спин-зависимые поперечные сдвиги между лево- и право- циркулярно поляризованными компонентами. В этой работе мы демонстрируем продольный спиновый эффект Холла при отражении света от субволновой никелевой решётки, усиленный поверхностным плазмонным резонансом. Используя стандартную теорию ФСЭХ, мы показываем, что угловые

сдвиги в плоскости могут быть изменены со спин-независимых (сдвиг Гуса–Хенкен [3 - 7]) на спин-зависимые (ФСЭХ) при незначительном изменении состояния поляризации падающего пучка.

На рис. 1 представлены измеренные и рассчитанные профили интенсивностей отражённого пучка при разных углах поляризации γ падающего пучка.

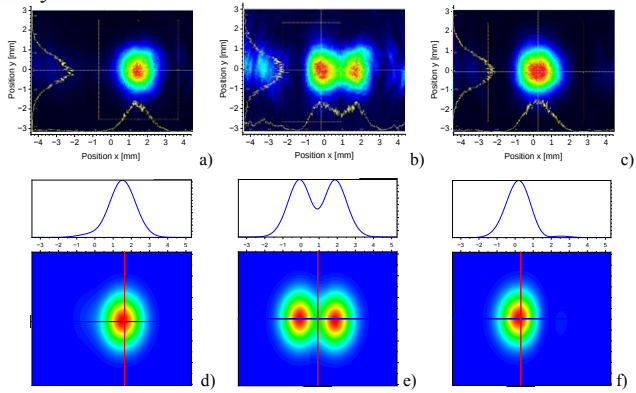


Рис. 1. Измеренные (a, b, c) и рассчитанные (d, e, f) профили интенсивностей отражённого пучка, прошедшего через фильтр LCP на расстоянии z = 25 см от дифракционной структуры: $\theta_i = \theta_{res} = 33.53$ °, $\gamma = -4$ °(a, d), $\gamma = 0$ °(b, e), $\gamma = 4$ °(c, f)

Для никелевой субволновой решётки были продемонстрированы чрезвычайно большие угловые сдвиги. Мы обнаружили, что эти сдвиги очень чувствительны к углу падения и состоянию поляризации. Поляриметрические измерения демонстрируют деполяризацию света, вызванную поверхностным плазмонным резонансом, и смешение состояний поляризации. Высокая степень разделения фотонов по спинам достигается при оптимальном состоянии поляризации и резонансном угле падения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного задания FFNS-2022-0009.

Список литературы

1. Федоров Ф.И. // Доклады АН СССР. 1955. Т. 105. № 3. С. 465-468.
2. Imbert C. // Phys. Rev. D. 1972. V. 5. No. 4. P. 787-796.
3. Goos F., Hänchen H. // Annalen der Physik. 1947. V. 436. P. 333-346.
4. Petrov N.I. // J. Mod. Opt. 2005. V. 52. P. 1545-1556.
5. Petrov N.I. // J. Opt. 2013. V. 15. P. 014011.
6. Petrov N.I., Danilov V.A., Popov V.V., Usievich B.A. // Opt. Express. 2020. V. 28. P. 7552.
7. Petrov N.I., Sokolov Y.M., Stoiakin V.V., et al. // Photonics. 2023. V. 10. P. 180.

УДК 535(06)+004(06)

О.В. МИНИН[1], И.В. МИНИН[1,2]
[1]Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск
[2]Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники – филиал Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск

СПИРАЛЬНАЯ ЗОННАЯ ПЛАСТИНА НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ ОПОРНОЙ ФАЗЫ СОРЕ-МИНИН-ВЕББ

Оптимизацию фокусирующих свойств спиральных зонных пластин в части формирования оптических вихрей, контроля обратного потока энергии, трапинга наночастиц, целесообразно проводить на основе концепции опорной фазы Соре-Минин-Вебб. До сих пор задача синтеза и оптимизации спиральных зонных пластин осуществлялась на основе нулевой опорной фазы, как это было принято Френелем по умолчанию. Практическое применение опорной фазы может быть использовано в акустике, оптике и терагерцовых диапазонах.

O.V. MININ[1], I.V. MININ[1,2]
[1]Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk
[2]Technological Design Institute of Applied microelectronics –Branch of Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of Siserian Branch of the RAS, Novosibirsk

SPIRAL ZONE PLATE BASED ON THE CONCEPT OF THE SORET-MININ-WEBB REFERENCE PHASE

Optimization of the focusing properties of spiral zone plates in terms of optical vortex formation, reverse energy flow control, and nanoparticle trapping should be carried out based on the Soret-Minin-Webb reference phase concept. Until now, the task of synthesis and optimization of spiral zone plates was carried out based on the zero reference phase, as was accepted by Fresnel by default. The reference phase can be used in acoustics, optics, and terahertz ranges.

Широкое распространение в телекоммуникации, спектроскопии, микроскопии, для характеризации материалов получил класс вихревых пучков, в которых применяются спиральные зонные пластины. Термин «оптический вихрь» (ОВ) был впервые введён в 1989 году [1]. В 1992 году был предложен голографический метод синтеза спиральной зонной пластины [2]. В этом же году в [3] было предложено семейство зонных пластин для фокусировки излучения в произвольную плоскую кривую (рис. 1 и 2) или линию с увеличенной глубиной фокуса [3, 4]. Френель, определяя зоны конструктивной и деструктивной интерференции

излучения, для упрощения анализа, присвоил начальной фазе (или опорной фазе) значение равное нулю. Такое приближение (нулевая начальная фаза) было принято во всех классических учебниках по оптике, фотонике [5].

В 1988 году нами впервые было показано, что так называемый опорный радиус (произвольный размер первой зоны Френеля) является свободным параметром, выбором которого возможно регулировать распределение интенсивности поля в области фокусировки [6, 7]. Более того, по свидетельству М. Берри результаты [8] вплотную приблизились к реализации эффекта суперосцилляций, хотя сам эффект не упоминался. Опорный радиус эквивалентен опорной фазе [9].

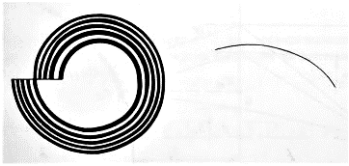


Рис. 1. Спиральная зонная пластину для фокусировку в дугу [3]

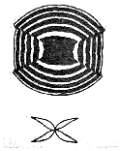


Рис. 2. Зонная пластина для фокусировки в плоскую кривую [3]

Как показали вычислительные эксперименты, оптимизацию фокусирующих свойств спиральных зонных пластин в части формирования ОВ, контроля обратного потока энергии, трапинга наночастиц, целесообразно проводить на основе концепции опорной фазы Соре-Минин-Вебб. Правильный выбор начальной фазы позволяет оптимизировать и составные спиральные зонные пластины путем кодирования модуляции центральной зоны произвольного размера. В этом случае нулевой порядок дифракции имеет провал интенсивности в области фокуса с повышенным содержанием выбранной вихревой моды.

Список литературы

1. Coullet P, Gil L, Rocca F. // Opt. Commun. 1989. V. 73. P. 403.
2. Heckenberg N.R., et al. // Opt. Lett. 1992. V. 17. P. 221.
3. Минин И.В., Минин О.В. Дифракционная квазиоптика. М.: Информ ТЭИ, 1992.
4. Minin O.V., Minin I.V. Diffractional optics of millimeter waves. Bristol: IoP, 2004.
5. Saleh B.E., Teich M.C. Fundamentals of Photonics, 2nd ed. New York: Wiley, 2007.
6. Минин И.В., Минин О.В. // Авторское свидетельство на изобретение SU1617398A1 от 26.09.1988, опубл. БИ 48, 1990.
7. Minin I.V., Minin O.V. // Sov. J. Quantum Electron. 1990. V. 20. P. 198.
8. Berry M. // Private communication. January 31, 2024.
9. Minin I.V., Minin O.V., Webb G. // Proc. of 18th Int. Conf. on ICECOM 2005. 2005. P. 1-4.

УДК 535(06)+004(06)

А.Р. МУХАМЕДЯНОВ, А.А. ЗЯБЛОВСКИЙ, Е.С. АНДРИАНОВ
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В ДВУХМОДОВОЙ ОПТОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ С ОСОБОЙ ТОЧКОЙ

Приведены результаты теоретических и численных вычислений, подтверждающих наличие особой точки и параметрической неустойчивости в двухмодовой оптомеханической системе с сильной связью. Определены условия существования особой точки, генерации когерентного излучения (порог генерации) и продемонстрировано существование параметрической неустойчивости ниже порога генерации.

A.R. MUKHAMEDYANOV, A.A. ZYABLOVSKY, E.S. ANDRIANOV
Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

PARAMETRIC INSTABILITY IN A TWO-MODE OPTOMECHANICAL SYSTEM WITH AN EXCEPTIONAL POINT

We present the results of theoretical and numerical calculations confirming the presence of a singular point and parametric instability in a two-mode optomechanical system with strong coupling. The conditions for the existence of a exceptional point, generation of coherent radiation (generation threshold) are determined, and the existence of parametric instability below the generation threshold is demonstrated.

В данной работе рассмотрена оптомеханическая система с особой точкой [1]. Системы, в которых существуют особые точки представляют практический интерес для создания сенсоров, лазеров с узкой диаграммой направленности, лазерных интерферометров и других устройств. Недавно было показано, что особая точка может наблюдаться в оптомеханических системах, возбуждаемых внешней волной [2]. Показано, что такую систему можно использовать для достижения генерации когерентного излучения ниже порога оптомеханической неустойчивости [1].

Мы рассмотрели оптомеханическую систему, состоящую из двух оптических мод, которые взаимодействуют с модой механических колебаний (фононами).

Для рассматриваемой оптомеханической системы были определены условия, при выполнении которых существует особая точка, которая разделяет режимы сильной и слабой связи [1]. Кроме того, численные вычисления показали, что в системе существует порог генерации. Продемонстрировано, что в режиме сильной связи уравнения движения сводятся к параметрическому осциллятору, который, в соответствии с теорией параметрического осциллятора [3], дает неустойчивое решение.

Уравнения движения сводятся к уравнению параметрического осциллятора, когда амплитуда внешней волны (накачка) меньше порогового значения генерации и периодически изменяется во времени. В таком случае мы получаем подпороговую генерацию в лазере, вследствие параметрической неустойчивости, как показано на рис. 1.

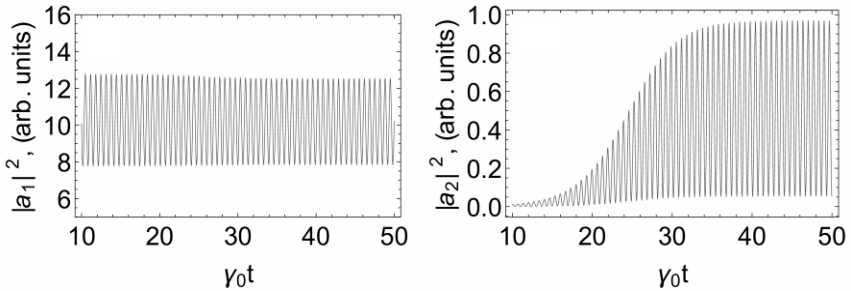


Рис. 1. Временные зависимости интенсивностей электромагнитного поля в первой (слева) и во второй (справа) оптических модах, когда амплитуда внешней волны периодически изменяется во времени

Практическая значимость полученного результата заключается в том, что на основе данной оптомеханической системы возможно создать фононный транзистор. Суть заключается в том, что модулированная во времени внешняя волна является суперпозицией двух волн: накачки и управляющей. Вблизи порога генерации небольшое увеличение интенсивности управляющей волны приводит к резкому возрастанию интенсивности второй моды [1]. Таким образом, в данной системе возможно управлять интенсивностью генерации при помощи управляющего сигнала с низкой интенсивностью.

Список литературы

1. Mukhamedyanov A., et al. // Optics Letters. 2023. V. 48 (7). P. 1822-1825.

2. Jing H., et al. // Physical Review Letters. 2014. V. 113 (5). P. 053604.

3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. // Курс теоретической физики. Том I. Механика. 2004. С. 107-111.

И.В. МИНИН[1,2], О.В. МИНИН[2]
[1]*Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники – филиал Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск*
[2]*Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск*

ОПТИКА ЗАМЕРЗАЮЩИХ МЕЗОРАЗМЕРНЫХ КАПЕЛЬ – НОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ В МЕЗОТРОНИКЕ

Примерами наноструктурированного света, полученного с помощью мезомасштабной капли, являются нерезонансные эффекты, такие как фотонный крючок и фотонная струя, которые возникают в результате взаимодействия плоской волны с мезомасштабной замерзающей каплей. Настраивая толщину слоя льда, можно спроектировать динамический резонанс Фано во время замерзания капли воды снаружи внутрь. Наши теоретические результаты предсказали изменяющиеся во времени нетрадиционные резонансы Фано. Изменяющиеся во времени такие резонансы Фано открывают новый метод манипулирования взаимодействиями света и материи, которые ранее не рассматривались.

I.V. MININ[1,2], O.V. MININ[2]
[1]*Technological Design Institute of Applied microelectronics –Branch of Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of Siserian Branch of the RAS, Novosibirsk*
[2]*Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk*

OPTICS OF FREEZING MESOSCALE DROPLETS – A NEW DIRECTION IN MESOTRONICS

Examples of nanostructured light obtained with mesoscale droplet are the non-resonant effects as a photonic hook and photonic jet, which results from the plane-wave interaction with a mesoscale freezing droplet. Tuning the ice layer thickness, one may engineer a dymanic Fano-like resonance during a freezing from the outside in water droplet. Our theoretical results have predicted the time- varying unconventional Fano resonances in a freezing water droplet. Time-varying Fano resonance open new method to manipulate light–matter interactions as never thought before**.**

Физика образования тумана в системе жидкость-пар была дважды отмечена Нобелевскими премиями. Однако до сих пор оптика капель воды изучалась без учёта фазового перехода вода-лед. Экспериментальные исследования ([1] и цитированную там литературу) показывают, что фазовый переход в каплях переохлаждённой воды с малым числом Бонда представляет чрезвычайно сложный, быстрый и многостадийный процесс.

Однако в известные теоретические модели не были включены эффекты, связанные с магнитными полями, формирующимся в замерзающей капле. В тоже время, изменение толщины ледяной оболочки в замерзающей капле воды приводит к значительным динамическим изменениям в интенсивностях электрических и магнитных полей внутри капли.

Недавно было открыто, что капля жидкости с ледяной оболочкой представляет собой резонатор, в котором при определенных условиях могут возбуждаться зависящие от времени резонансы Фано, приводящие к генерации больших электрических и магнитных полей [2]. В результате, на определенной стадии замерзания капля испускает сильный магнитный импульс [2, 3]. Заметим, что публикации по нестационарным резонансным эффектам в мировой литературе практически отсутствуют. Между тем первые пионерские результаты [2] обнаруживают наличие новых эффектов, отсутствующих в стационарном случае. Структура поля внутри замерзающей капли характерна для случая, в котором на определенном этапе замерзания мода высокого порядка интерферирует с модами низкого порядка, что приводит к Фано резонансу высокого порядка. Причём амплитуда резонансной моды на несколько порядков выше когерентной суммы всех остальных мод [4, 5].

В нерезонансном случае замерзающая капля воды позволяет формировать локализованные пучки света (фотонную струю и фотонный крючок) в её теневой части. Такие пучки могут служить основой для создания оптических переключателей из экологически чистых природных материалов [6, 7].

Открытие аномального рассеяния света, качественно отличающегося от вошедшего в учебники рэлеевского (фотонная струя и фотонный крючок); предсказания изменяемых во времени резонансов Фано высокого порядка в оптике; генерацию гигантских магнитных полей при рассеянии света немагнитным мезоразмерными частицами открывают новое направление в мезотронике [8].

Список литературы

1. Kalita A., Mrozek-McCourt, et al. // Nature. 2023. V. 620. P. 557.
2. Minin I.V., Minin O.V., Zhou S. // Preprint. 2023. 10. DOI: 10.1364/opticaopen.24320959.
3. Minin I.V., Minin O.V., Zhou S., Luk'yanchuk B. // Sci Rep. 2024. V. 14. P. 24118.
4. Minin I.V., Minin O.V., Zhou S. // JETP Letters. 2022. V. 116 (3). P. 144.
5. Minin O.V., Zhou S., Minin I.V. // Annalen der physic. 2023. V. 535 (12). P. 2300337.
6. Minin O.V., Minin I.V., Cao Y. // Sci. Rep. 2023. V. 13(1). P.. 7732.
7. Minin O.V., Cao Y., Minin I.V. // Nanomaterials. 2023. V. 13 (15). P. 2168.
8. Minin I.V., Minin O.V. // Photonics. 2022. V. 9 (10). P. 762.

М.В. АГРИНСКИЙ, В.М. ВОЛЫНКИН[1], Д.Г. ОТКУПМАН[2]
Оптико-механическое конструкторское бюро «АСТРОН», Лыткарино
[1]Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург
[2]Московский государственный университет геодезии и картографии

СОЗДАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ НЕТРАДИЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ПОВЫШЕННОЙ РАДИАЦИОННОЙ УСТОЙЧИВОСТЬЮ

Приведено конструктивное решение базовой оптической схемы с использованием нетрадиционных оптических материалов на основе гелеобразных оптических сред и термопластичных (термопластных) оптических сред (ТОМ), позволяющее реализовывать радиационно-стойкие объективы с высоким качеством изображения.

M.V. AGRINSKY, V.M. VOLYNKIN[1], D.G. OTKUPMAN[2]
Optical and Mechanical Design Bureau «ASTRON», Lytkarino
[1]S.I. Vavilov State Optical Institute, Saint-Petersburg
[2]Moscow State University of Geodesy and Cartography

CREATION AND APPLICATION OF NON-TRADITIONAL OPTICAL MATERIALS WITH INCREASED RADIATION RESISTANCE

A constructive solution of the basic optical scheme using non-traditional optical materials based on gel-like and thermoplastic is presented, which makes it possible to realize radiation-resistant lenses with high image quality.

Для проектирования объективов-апохроматов с повышенными требованиями к радиационной нагрузке (радиационно-оптической устойчивостью к γ-излучению дозами 10^6 Р) была создана пара материалов: 1) гелеобразная оптическая среда (ГОС**)** на основе органосилоксанов, которая получается при гидролизной поликонденсации дихлорполиорганосилоксанов; 2) термопластичная оптическая среда (ТОМ), полученная путём очистки эпоксидной смолы от соли, образующейся при синтезе. Температурный коэффициент показателя преломления спектральной линии D $dn/dt = 3 \cdot 10^{-5}$ K^{-1}. [1, 2].

Технические характеристики материалов представлены в табл. 1.

На основе разработанных материалов выполнен расчёт объектива (рис. 1), со следующими характеристиками: фокусное расстояние

f’ = 50 мм; угловое поле 2ω = 8°; относительное отверстие D/f’ = 1 : 2,5; рабочий спектральный диапазон Δλ = 0,4 - 0,8 мкм. Аберрационная коррекция рассчитанного объектива показана на рис. 2.

Таблица 1. Технические характеристики радиационно-устойчивых оптических сред

Характеристика	**ГОС**	**ТОМ**
Показатели преломления:		
n_F	1,416	1,598
n_D	1,410	1,586
n_C	1,407	1,581
Относительная частная дисперсия p_{FD}	0,667	0,706
Коэффициент дисперсии ν_D	45	34
Рабочий интервал температур, °С	от −50 до +150	от −60 до +80
Область прозрачности, мкм	0,29 - 2,5	0,39 - 2,0

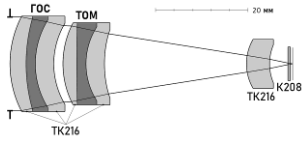


Рис. 1. Оптическая схема объектива

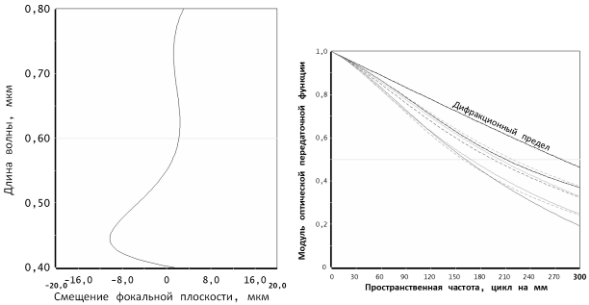


Рис. 2. Хроматизм положения для зонального луча (0, 7) и функция передачи модуляции

Список литературы

1. Агринский М.В., Волынкин В.М., Старцев В.В., Шаров А.А. Создание и применение нетрадиционных оптических материалов с повышенной радиационной устойчивостью // Оптический журнал. 2020. Т. 87. № 5. С. 96-99.

2. Агринский М.В., Старцев В.В., Шаров А.А. Проектирование микрообъективов на основе созданных гелеобразных и термопластных оптических материалов и разработанной технологии изготовления из них линз // XXVI Межд. науч.-техн. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения: тезисы докладов. М.: АО «НПО «Орион», 2022. С. 123-124.

УДК 535(06)+004(06)

П.Ю. ЛОБАНОВ, М.Н. МЕШКОВ, Г.М. САГИТОВ,
О.Е. СИДОРЮК
Научно-исследовательский институт «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха, Москва

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО КОНТРОЛЯ НА ОПЕРАЦИЯХ ШЛИФОВКИ МЕМБРАН В ПРЕЦИЗИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЯХ

Рассмотрен метод контроля толщины мембран из стеклокерамики на операциях их шлифовки свободным абразивом. Произведена оценка точности измерений и перспектив использования описанного подхода для повышения степени автоматизации технологии производства прецизионных оптических деталей.

P.Yu. LOBANOV, M.N. MESHKOV, G.M. SAGITOV,
O.E. SIDORYUK
POLYUS Research Institute of M.F. Stelmakh, Moscow

AUTOMATION OF PRODUCTION MONITORING IN THE OPERATIONS OF GRINDING MEMBRANES IN PRECISION OPTICAL PARTS

The method of monitoring the thickness of glass-ceramic membranes at operations of their grinding with free abrasive is considered. The accuracy of measurements and the prospects of using the described approach to increase the degree of automation of the technology of production of precision optical parts are evaluated.

В конструкциях прецизионных лазерных систем широко используются оптические элементы для активной стабилизации длины резонатора [1]. В большинстве случаев их основой является зеркало, которое сопряжено с мембраной, допускающей микроперемещения под управлением пьезоактуатора. Формообразование заготовок таких деталей в настоящее время успешно выполняется посредством фрезеровки алмазным инструментом на станках с ЧПУ. А на последующих стадиях производства окончательный результат достигается с применением технологий шлифовки и полировки свободным абразивом ряда функциональных поверхностей.

Существенно, что шлифовка необходима для финишной обработки тонких мембран, поскольку наряду с достижением заданных параметров точности толщины и плоскопараллельности граней должна быть

обеспечена определённая шероховатость их поверхностей. Последнее требование непосредственно связано с выполнением гарантий по уровню механических характеристик мембран, в том числе их прочности на изгиб.

Препятствием для автоматизации этого процесса на притирочных станках является традиционно применяемая методика контроля геометрических параметров мембран с помощью ручных механических микрометров. Дополнительные ограничения накладывает и необходимость отмывки деталей перед проведением каждого замера.

В настоящей работе создана установка, в которой обрабатываемая деталь из оптического ситалла СО-115М (рис. 1*а*) зажата с трёх сторон стеклянными пластинами (рис. 1*б*), через которые ведется непрерывный мониторинг торца мембраны (рис. 1*в*) посредством цифровых микроскопов. Иммерсионный гель на боковой поверхности детали обеспечивает чёткость получаемых изображений.

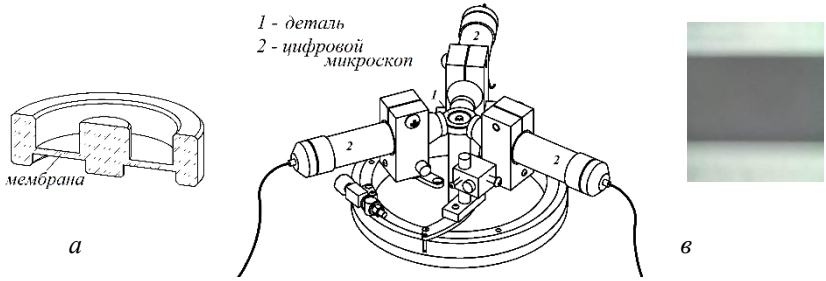


Рис. 1. Мониторинг толщины и плоскопараллельности мембраны

Численный анализ цифровых изображений позволяет в режиме реального времени определять толщину мембраны. Выбором ширины столбцов пикселей фотоприёмных матриц удается производить усреднение, дающее в результате погрешность измерений в пределах 1 %. Эти данные являются параметрами, на основе которых компьютерная программа формирует сигналы управления вращающимся шлифовальником и его прижимом к детали в процессе обработки свободным абразивом (находится сверху, на рис. 1 не показан). Трёхканальный контроль позволяет обеспечивать не только требуемую толщину пластины, но и высокую плоскопараллельность её граней.

Список литературы

1. Yu X.-D., Gao N., Xie Y.-P., et al. // Int. J. Appl. Electrom. 2015. V. 49. P. 327-333.

УДК 535(06)+004(06)

Д.Г. ДЕНИСОВ, Д.А. МАШОШИН
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ КАНАЛА ПОДСВЕТА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА, РЕГИСТРИРУЮЩЕГО РАССЕЯННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Исследовано и экспериментально проанализировано влияние линзовой и зеркальной оптических схем канала подсвета оптико-электронной системы измерения параметров шероховатости ангстремного уровня оптических поверхностей на эволюцию поляризационных характеристик лазерного излучения, формируемого до оптической поверхности исследования. Представлены общие теоретическое положения метода дифференциального рассеяния, лежащего в основе принципа измерения параметров шероховатости на основе регистрации рассеянного (дифрагированного) лазерного излучения, имеющего линейное состояние поляризации.

D.G. DENISOV, D.A. MASHOSHIN
Bauman Moscow State Technical University

COMPARATIVE ANALYSIS OF OPTICAL SYSTEMS OF THE ILLUMINATION CHANNEL OF AN OPTOELECTRONIC DEVICE THAT REGISTERS SCATTERED RADIATION FOR QUALITY CONTROL OPTICAL SURFACES

The influence of lens and mirror optical schemes of the illumination channel of an optoelectronic system for measuring the roughness parameters of the angstrom level of optical surfaces on the evolution of the polarization characteristics of laser radiation generated up to the optical surface of the study has been investigated and experimentally analyzed. The general theoretical provisions of the differential scattering method, which underlies the principle of measuring roughness parameters based on the registration of scattered (diffracted) laser radiation having a linear polarization state, are presented.

В результате представленного сравнительного анализа влияния двух оптических схем на эволюцию исходных параметров состояния поляризации лазерного излучения: коэффициента эллиптичности, угла азимута (угла поворота большой оси эллипса поляризации), деполяризации лазерного излучения, модуля фазовой анизотропии, сделаны рекомендации о целесообразности применения линзовой оптической системы в канале подсвета оптико-электронного прибора

контроля качества оптических поверхностей на основе детектирования рассеянного лазерного излучения [1 - 4]. С целью проведения исследований по оценке и анализу эволюции поляризационных характеристик формируемого оптического излучения каналом подсвета в методе дифференциального рассеяния был разработан макетный образец с возможностью модификации канала подсвета при установке как линзовой, так и зеркальной оптических систем, предварительно рассчитанных в системе автоматизированного проектирования «Zemax». Сравнительный анализ оптических систем, показывает, что линзовая оптическая система является более предпочтительной с точки зрения коэффициента изменения степени поляризации. Так например анализируя значения модуля фазовой анизотропии можно видеть, что вносимый «скачок» в разность фаз между двумя компонентами в зеркальной системе в 17 раз больше, что является отрицательным фактором. При малейших разъюстировках элементов линзовой системы этот «скачок» может увеличиваться в разы, что безусловно приведёт к изменению исходного линейного состояния поляризации, а значит к увеличению погрешности проводимых измерений эффективных значений среднеквадратических отклонений параметров шероховатости в методе дифференциального рассеяния, основная идеология которого построена на детектировании плоских линейно поляризованных волн. Для подтверждения данного факта в работе был проведён дополнительный эксперимент, посвящённый анализу влияния углов падения на плоское зеркало с алюминированием. Полученные в работе экспериментальные данные позволяют перейти к анализу влияния эволюции характеристик состояния поляризации лазерного излучения, рассеянного оптической поверхностью, в методе дифференциального рассеяния на результат определения эффективного значения среднеквадратического отклонения высотного параметра шероховатости. В этом случае погрешности восстановления исходного эффективного значения $\sigma_{эфф} = 1 \cdot 10^{-10}$ м в результате проведённого сравнительного анализа составили: $0{,}1 \cdot 10^{-10}$ м для линзовой оптической системы и $0{,}31 \cdot 10^{-10}$ м для зеркальной оптической системы.

Список литературы

1. Денисов Д.Г. Анализ влияния ограничительных факторов в методе дифференциального рассеяния при контроле поверхностных неоднородностей субнанометрового уровня профилей оптических деталей // Прикладная физика. 2022. № 1. С. 89-96.

2. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. Случайные поля. М.: Наука, 1966.

3. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир, 1981.

4. Карасик В.Е., Денисов Д.Г., Сахаров А.А., Мухина Е.Е. Методы и приборы управления параметрами лазерного излучения.. Электрооптические устройства. М., 2022.

УДК 535(06)+004(06)

А.П. СЕМЕНОВ[1], А.Д. ТАМБОВСКИЙ[1], В.Е. ПАТРИКЕЕВ[1], А.В. КУДРЯВЦЕВ[1,2]
[1]Лыткаринский завод оптического стекла
[2]Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

КОНТРОЛЬ ВНЕОСЕВЫХ АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ДИФРАКЦИОННЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Приведены результаты разработанного способа контроля внеосевых поверхностей оптических деталей с использованием дифракционных оптических элементов, преобразующих сферический волновой фронт в асферический внеосевой, падающий по нормали на оптическую вогнутую или выпуклую поверхность и возвращающийся обратно в интерферометр. Способ позволил изготовить большое количество крупногабаритных внеосевых оптических деталей.

A.P. SEMENOV[1], A.D. TAMBOVSKIY[1], V.E. PATRIKEEV[1], A.V. KUDRYAVCEV[1,2]
[1]Lytkarino Optical Glass Factory
[2]Moscow State University of Technology «STANKIN»

TESTING OFF-AXIS ASPHERIC SURFACES WITH COMPUTER-GENERATED HOLOGRAMS

The results of the developed method of testing off-axis surfaces of optical parts using computer-generated holograms that transform a spherical wavefront into an aspherical off-axis one, incident normally on an optical concave or convex surface and returning back to the interferometer are presented. The method made it possible to manufacture a large number of large-sized off-axis optical parts.

В АО «ЛЗОС» уже много лет выполняются работы по изготовлению асферической осевой и внеосевой, вогнутой и выпуклой крупногабаритной оптики астрономического и космического назначения. В связи с тем, что современная оптика является высокоапертурной и высокоасферичной, а также часто стали использоваться внеосевые асферические поверхности и не только вогнутые, но и выпуклые, поэтому изготовлению и контролю таких оптических деталей уделяется в последнее время особое внимание [1, 2].

Успех обработки таких поверхностей в первую очередь зависит от возможностей их контроля. Для контроля формы поверхности зеркал в настоящее время широко используются дифракционные оптические элементы (ДОЭ) или computer generated holograms (CGH) в качестве корректоров волнового фронта. С их помощью выполняется контроль и центрировка асферической поверхности детали. Результаты практической работы зеркал в реальных условиях в телескопах подтвердили надежность и эффективность разработанных методов формообразования внеосевых поверхностей оптических деталей диаметром до 1.5 м.

Изготовлена целая серия высокоасферичных внеосевых зеркал, например, детали диаметром 1125 мм с внеосевой параболической поверхностью, с вершинным радиусом 6000 мм с асферичностью 611 мкм, которые контролировались в вертикальной схеме с ДОЭ (рис. 1), преобразующим внеосевой асферический волновой фронт в сферический: *1* – контролируемая внеосевая поверхность оптической детали, *2* – интерферометр, *3* – ДОЭ-корректор (рис. 2) со вспомогательными структурами для настройки относительно интерферометра и относительно контролируемой детали. Достигнутое отклонение волнового фронта от требуемого составляет RMS = 0.048λ, λ = 0,6328 мкм.

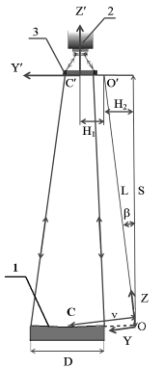


Рис. 1. Схема контроля внеосевой поверхности детали с ДОЭ

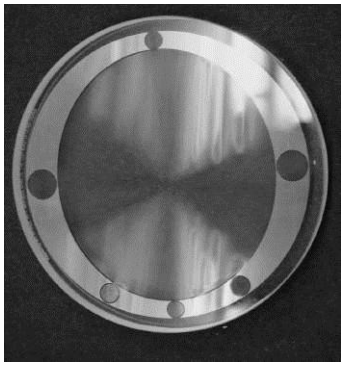


Рис. 2. Фотография дифракционного оптического элемента (ДОЭ)

Список литературы

1. Семенов А.П., Абдулкадыров М.А., Патрикееев В.Е., Морозов А.Б., Насыров Р.К. Методы контроля формы осевых и внеосевых асферических поверхностей с дифракционным оптическим элементом, определением децентрировки и учетом дисторсии при их формообразовании // Фотоника. 2022. Т. 16..№ 4. С. 318-327 (Ч. 1). №5. С. 392-402 (Ч. 2).

Ю.Д. РОСЧИХМАРОВА, С.А АНЦИФЕРОВ, С.А. БУЙКО,
В.Ю. ГЛАДКИЙ, Е.Н. МАКЕЙКИН, С.В. МАРКИН
Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Нижегородская обл.

АЛГОРИТМ НАЧАЛЬНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ СЕГМЕНТИРОВАННОГО ЗЕРКАЛА НА ОСНОВЕ Z-СКАНИРОВАНИЯ

Приведён новый алгоритм позиционирования сегментированных зеркал и телескопов на основе Z-сканирования. Представлен результат применения алгоритма для плоского сегментированного зеркала из четырёх сегментов.

Yu.D. ROSCHIKHMAROVA, S.A. ANTSIFEROV, S.A. BUYKO,
V.Yu. GLADKIY, E.N. MAKEYKIN, S.V. MARKIN
All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Nizhny Novgorod region

Z-SCAN BASED SEGMENTED MIRROR INITIAL POSITIONING ALGORITHM

A new algorithm for positioning segmented mirrors and telescopes based on Z-scanning is presented. The results of applying the algorithm for a flat segmented mirror of four segments are presented.

Главной особенностью алгоритма является анализ изображений, получаемых при установке камеры в нескольких точках на оси распространения излучения (ось Z) в прифокальной области (Z-сканирование). Схема экспериментальной установки для позиционирования сегментов зеркала приведена на рис. 1.

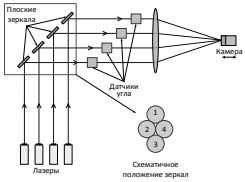


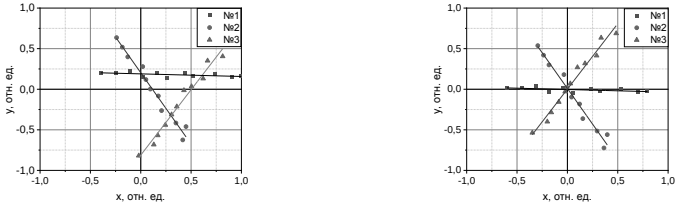
Рис. 1. Схема экспериментальной установки

В эксперименте осуществляется последовательная подача излучения от каждого k-ого излучателя на k-ый сегмент зеркала. Блок датчиков угла

показывает отклонение текущих положений сегментов от их начальных положений. Излучение после отражения от сегмента зеркала попадает на линзу, с помощью которой фокусируется на камере, установленной на линейном трансляторе.

На первом этапе реализации алгоритма определяют координаты центроидов изображений, создаваемых каждым сегментом в плоскости камеры. Измерения повторяют для нескольких положений камеры. На втором этапе траектории центроидов изображений при смещении камеры вдоль оси Z аппроксимируют прямой с помощью метода наименьших квадратов (МНК). На третьем этапе осуществляют совмещение центроидов изображений отдельных сегментов друг с другом в выбранной плоскости на оси Z за счёт введения наклонов в сегменты составного зеркала.

Алгоритм был применён для позиционирования плоского сегментированного зеркала. На рис. 2*а* показаны траектории центроидов до позиционирования, которые не пересекались в одной точке, а на рис. 2*б* после позиционирования – траектории пересекаются в одной точке. Точность позиционирования зеркал составила 2 ”.



а *б*

Рис. 2. Перемещение центроидов пятен ЛИ каждого сегмента при Z-сканировании: до позиционирования (*а*), после позиционирования (*б*)

Данный алгоритм может быть использован как в качестве окончательного этапа позиционирования сегментов, так и в качестве подготовительного этапа к более точному позиционированию сегментов.

Список литературы

1. Сычев В.В. Теория и практика адаптивных оптических систем (прикладная адаптивная оптика). М.: Горячая линия –Телеком, 2023.

2. Sechak E., Rumyancev A., et al. // International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT). 2020. P. 1-3.

УДК 535(06)+004(06)

Е.Н. КОТЛИКОВ, Н.П. ЛАВРОВСКАЯ
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ОПТИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ ПЛЁНОК ZnSe В ВИДИМОЙ И БЛИЖНЕЙ ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТЯХ СПЕКТРА

Плёнки ZnSe широко используются в инфракрасной части спектра 1 - 25 мкм. В этой области они прозрачны и удобны для использования. В работе описана методика измерения и расчёта оптических констант и приведены значения показателя преломления и коэффициента экстинкции плёнок ZnSe для диапазона спектра 0,5 - 1,3 мкм.

E.N. KOTLIKOV, N.P. LAVROVSKAYA
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

OPTICAL CONSTANTS OF ZnSe FILMS IN THE VISIBLE AND NEAR-INFRARED REGIONS OF THE SPECTRUM

Films of ZnSe are widely used in the infrared region of the spectrum of 1-25 microns. In this range, the films are transparent and have good performance. The paper describes the method of measuring and calculating of optical constants. The values of the refractive index and extinction coefficient of ZnSe films are given for the spectral range of 0.5-1.3 μm.

Плёнки ZnSe, используемые в оптическом приборостроении, изготавливались на установке вакуумного напыления плёнок УВН-71 на подложках из стекла М4, прозрачных в диапазоне 0,4 - 2,2 мкм.

Существуют методики определения показателя преломления и коэффициента поглощения плёнок. Обычно анализирует спектры пропускания и отражения света [1 - 3]. Измерение проводилось на спектрофотометре «Фотон», работающем в диапазоне спектра 0,2 - 3,6 мкм.

На рис. 1 показаны спектры пропускания T, отражения R и поглощения A плёнок ZnSe оптической толщиной 0,4 мкм. В области ниже 0,6 мкм плёнки сильно поглощают. Поэтому применение прямых спектрофотометрических методов определения оптических констант невозможно. Для их применения предварительно экспериментальные спектры корректируются на поглощение [4].

Для нахождения оптических постоянных и расчёта спектров использовалась программа анализа и синтеза спектров FilmAnalisis [5]. На рис. 2 приведены спектры плёнки ZnSe после коррекции.

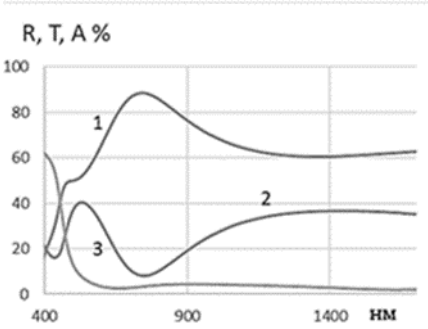


Рис. 1. Спектры плёнки ZnSe: пропускание (*1*), отражение (*2*), поглощение (*3*)

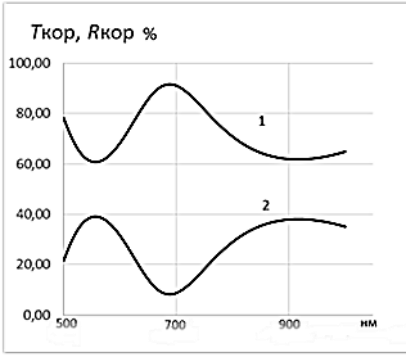


Рис. 2. Спектры плёнки ZnSe после коррекции: пропускание (*1*), отражение (*2*)

В табл. 1 приведены результаты расчёта показателя преломления и коэффициента экстинкции плёнки селенида цинка.

Таблица 1

λ, нм	500	600	700	800	1000	1200	1600
n	2,60	2,45	2,42	2,40	2,38	2,36	2,35
k	0,050	0,012	0,032	0,002	0,001	0,0003	0

В результате проведённых исследований определены оптические константы плёнок ZnSe в диапазоне спектра 0,5 - 1,6 мкм. Показано, что эти плёнки могут использоваться в ахроматических интерференционных покрытиях в диапазоне спектра выше 0,5 мкм.

Список литературы

1. Кулакова Н.А., Насыров А.Р., Несмелова И.М. // Опт. журнал. 2010. № 77 (5). С. 34.

2. Котликов Е.Н., Новикова Ю.А., Юрковец Е.В. // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2018. Т. 61. № 6. С. 521.

3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970.

4. Котликов Е.Н. // Опт. журнал. 2021. Т. 88. № 7. С. 57.

5. Котликов Е.Н., Юрковец Е.В. Программа анализа спектров плёнок FilmAnalisis. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018611718. 06.02.2018.

УДК 535(06)+004(06)

А.Ю. ПОГИБА, А.П. КОНДРАТОВ
Московский политехнический университет

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА ПРИ ОТРАЖЕНИИ ОТ МНОГОСЛОЙНОЙ ПЛЁНКИ ПОЛИПРОПИЛЕНА

Исследуется влияние светоотражающих поверхностей: металлической, стеклянной и акриловой на эффект плеохроизма в поляризованном свете на прозрачных комбинированных полимерных покрытиях из двуосно-ориентированного полипропилена (ДОПП) толщиной 20 ± 2 мкм производства компании «Биаксплен». Оцениваются спектрофотометрические характеристики, координаты LAB и цветовое отклонение (дельта E).

A.Yu. POGIBA, A.P. KONDRATOV
Moscow Polytechnic University

INTERFERENCE OF POLARIZED LIGHT WHEN REFLECTED FROM A MULTILAYER POLYPROPYLENE FILM

The effect of various reflective surfaces of metal, glass and acrylic on the effect of pleochroism in polarized light in transparent combined polymer coatings of biaxially oriented polypropylene (BOPP) with a thickness of 20 ± 2 microns produced by Biaxplen is investigated. Spectrophotometric characteristics, LAB coordinates and color deviation (delta E) are evaluated.

Создать цвет без применения пигментов и красителей возможно при распространении света в слабо поглощающих структурах, например, многослойных комбинированных полимерных материалах, в которых возникает интерференция света после многократных отражений [1, 2]. Исследования структурной окраски материала представляют важную информацию об его функциональных возможностях, таких как передача сигналов, распознавание и маскировка [3].

Для изучения оптических характеристик из плёнки двуосно-ориентированного полипропилена (ДОПП) вырезали ленты различной длины, которые собирали в многослойные пакеты с последовательным увеличением длины (стопа Столетова). Схема стенда для изучения цвета и характеристик плёнки представлена на рис. 1. Пакеты помещались между поляризатором и анализатором, в качестве которого применяли различные виды отражающих поверхностей (акриловое, стеклянное и металлическое

зеркала). Цветные эффекты получали, варьируя количество слоёв в пакете. Производились визуальная оценка цвета, фотографирование и измерение координат цвета с помощью спектрофотометра X-Rite i1Pro с модулем командной строки spotread из ArgyllCMS версии 2.3.0.

Для объективной оценки цветового отличия образца и фона (цвет, полученный путём размещения поляризатора на отражающей поверхности) было рассчитано цветовое отклонение ΔE – величина, определённая на разности координат цвета двух сравниваемых объектов [4]. Предполагается, если ΔE варьируется в пределах 1,5 - 2 единиц, то человеческий глаз может не отличать цвета друг от друга [5].

Результаты расчёта цветового отличия представлены в виде столбчатой диаграммы ΔE и фотографий, полученных в дневном отражённом свете (рис. 2). Наибольшим цветовым отличием между «фоном» и плёнкой обладает однослойное комбинированное полимерное покрытие. Изменение цвета изображений происходит по мере увеличения толщины плёнок и количества слоёв. ΔE при одинаковом количестве слоёв плёнки на различных светоотражающих поверхностях имеет разные значения. Акриловое зеркало обладает большим показателем рассеивания прозрачной среды.

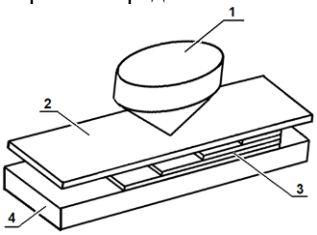


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – спектрофотометр; 2 – поляризатор; 3 – образец; 4 – зеркало

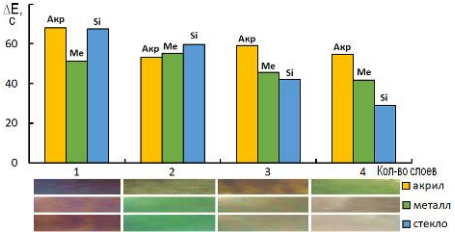


Рис. 2. Цветовое различие ΔE многослойной плёнки полипропилена на акриловой, металлической, стеклянной поверхности

Список литературы

1. Rassart M., Colomer J.-F., Tabarrant T., et al. Diffractive hygrochromic effect in the cuticle of the hercules beetle Dynastes Hercules // New Journal of Physics, 2008.

2. Xuan Z., et al. Artificial Structural Colors and Applications. DOI: 10.1098/rsif.2016.0933.

3. Liu F., Yin H., Dong B., Qing Y., et al. Inconspicuous structural coloration in the elytra of beetles Chlorophila obscuripennis (Coleoptera) //Physical Review E. 2008. V. 77.

4. Сулла С., Шишкин М.И. Измерение цвета: теория и практика // Лакокрасочные материалы и их применение. 2003. № 7-8. С. 36-39.

5. Фурман Н.Н., Вакор В.В., Третьякова А.Е., Сафонов В.В. Возможность применения инструментальных методов для контроля цвета ряда декоративных покрытий // Лакокрасочные материалы и их применение. 2015. № 5. С. 30-34.

УДК 535(06)+004(06)

Е.Ю. ПАТРИКЕЕВА, В.В. ИЛЬИНА
Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения

ОПТИКА И СВЕТОТЕХНИКА В РАБОТЕ КИНООПЕРАТОРА

Обозначен круг задач в области светотехники и оптики, решаемых кинооператором. Приведены основные характеристики съёмочных объективов и световых приборов, играющие первостепенную роль на съёмочной площадке. Указаны виды наиболее востребованных в настоящее время объективов и световых приборов.

E.Yu. PATRIKEEVA, V.V. IL'INA
Saint-Petersburg State University of Film and Television

OPTICS AND LIGHTING ENGINEERING IN THE OPERATOR'S WORK

The range of tasks in the field of lighting engineering and optics, solved by the operator, is indicated. The main characteristics of shooting lenses and lighting devices, which play a primary role on the set, are given. The types of lenses and lighting devices that are currently in demand are indicated.

В работе на съёмочной площадке кинооператоры используют разное съёмочное оборудование; основное – это съёмочные объективы и световые приборы. Выбор объектива обусловлен его фокусным расстоянием, которое влияет на крупность плана: часто при съёмке используют линейки оптики, которые могут состоять из 4 - 7 дискретных объективов с разными фокусными расстояниями. При выборе важны совместимость объектива и камеры (конструкция байонета), оптический рисунок и светосила объектива. Светосильный объектив позволяет вести съёмку в условиях низкой освещённости и эффективно управлять глубиной резко изображаемого пространства.

По оптическому рисунку объективы условно делят на мягкорисующие и жесткорисующие. Мягкорисующая оптика даёт изображение с пониженным контрастом, средней и низкой разрешающей способностью; у жесткорисующей оптики противоположные характеристики. Оба вида объективов используют для решения конкретных задач эмоционального воздействия на зрителей.

Оптический рисунок зависит от формы и количества лепестков диафрагмы, остаточных аберраций, виньетирования, качества

просветления. Часто перед съёмкой проводят тестирование оптики, результаты оценивают визуально, реже – программными средствами, например, в Imatest [1].

Также используют специальные виды объективов: панкратические (при выборе оценка идёт по перепаду увеличений) и объективы-анаморфоты (выбор такого объектива обусловлен коэффициентом анаморфирования). Панкратический объектив позволяет получить эффекты наезда / отъезда от объекта съёмки без использования операторской тележки и рельсов или для создания эффекта «транстрав» [1]. Для придания изображению особой выразительности можно использовать и целый ряд дополнительного оборудования кинооператора: светофильтры, зональные линзы, отражатели. Например, для создания светотеневого рисунка применяют световые приборы различного назначения (заливающего, рисующего, эффектного, контрового освещения). Для распределения в пространстве светового потока, поступающего от точечных источников света, используют различного рода рассеиватели и отражатели. При выборе светового прибора, прежде всего, руководствуются его способностью создавать определенную освещённость на некотором расстоянии, возможностью диммирования источника, типом источника света, фактором защиты светового прибора от влаги и пыли, цветовой температурой и индексом цветопередачи. Важно наличие дополнительных аксессуаров, таких как светозащитные шторки, дополнительные линзы, отражатели и рассеиватели [2].

Имеют значение также потребляемая световым прибором электрическая мощность, возможность дистанционного управления с помощью приложения, уровень шума, создаваемый пускорегулирующей аппаратурой и системой охлаждения, стабильность характеристик во времени, возможность регулировки размеров светового пятна и градиента освещённости в нем.

В настоящее время на съёмочных площадках активно используют приборы с галогенными, металлогалогенными и светодиодными источниками света. Последние всё чаще применяют на съёмочных площадках, так как обладают универсальностью, широким диапазоном цветовых температур, энергоэффективностью и экономичностью [3].

Список литературы

1. Артемов В. Справочник по кинооборудованию: объективы для кинематографа // Техника и технологии кино. 2010. № 6. С. 50-79.

2. Ландо С.М. Основы операторского дела. СПб.: СПбГИКиТ, 2019. С. 117-124.

3. Бабкин О.Э., Ильина В.В. Безопасность проведения съемки в музеях и на объектах культурного наследия // Мир техники кино. 2021. № 3. С. 11-15.

УДК 535(06)+004(06)

В.Г. ВОЛКОВ, П.Д. ГИНДИН, В.В. КАРПОВ, С.А. КУЗНЕЦОВ
АО «Московский завод «Сапфир», Москва

ТРЁХКАНАЛЬНЫЙ ПРИБОР НОЧНОГО ВИДЕНИЯ

Рассматривается трёхканальный прибор ночного видения всепогодного и круглосуточного действия, состоящий из ночного канала на базе электронно-оптического преобразователя, тепловизионного канала и дневного канала.

V.G. VOLKOV, P,D, GINDIN, V.V. KARPOV, S.A. KUZNETSOV
JSC «Moscow Plant «Sapphire», Moscow

THREE-CHANNEL NIGHT VISION DEVICE

A three-channel night vision device all-weather and round-the-clock operation is considered, consisting of a night channel based on an electron-optical converter, a thermal imaging channel and a daytime channel.

Широко известны приборы ночного видения (ПНВ) на основе электронно-оптических преобразователей (ЭОП). ПНВ обеспечивают видение ночью при нормальных погодных условиях (уровень естественной ночной освещённости (ЕНО) $\geq 3 \cdot 10^{-3}$ лк, нормальная прозрачность атмосферы $\tau_a \geq 0{,}8$). При плохой погоде и днём ПНВ не работает. Для всепогодной и круглосуточной работы предлагается ПНВ, с тепловизионным (ТВП) и дневным каналом. Блок-схема ПНВ дана на рис. 1, его внешний вид – на рис. 2.

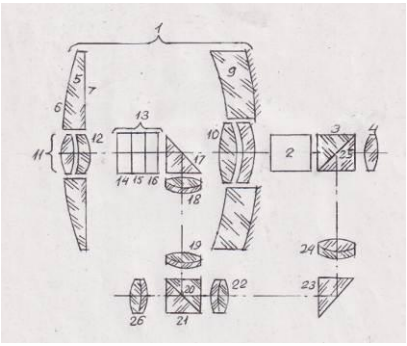


Рис. 1. Блок-схема ПНВ



Рис. 2. Внешний вид ПНВ

Ночью при нормальной погоде работает объектив *1*, ЭОП *2*, куб-призма *3* и окуляр *4*. ЕНО отражается от объекта наблюдения, фона, приходит в линзу-зеркало *5*, затем отражается от зеркала Манжена *9*, отражается от зеркальной поверхности *8*, и приходит в компенсатор полевых аберраций *10*. На его выходе на фотокатоде ЭОП, создаётся изображение объекта и фона. ЭОП *2* преобразует изображение в видимое и усиливает его по яркости. Оно наблюдается с экрана ЭОП *2* через призму *3* в окуляр *4*.

При работе днём в условиях нормальной прозрачности атмосферы линзовый дневной объектив *26* создает перевернутое изображение объекта и фона в дневном свете. Оно переносится через куб-призму *21*, линзу *22*, призму *23* в линзу *24*. Оно отражается от гипотенузной грани *25* куб-призмы *3* и передается в окуляр *4*.

При работе днём и ночью и при плохой погоде работает ИК-объектив *12*, установленнный в отверстии *11*. Он создает тепловое ИК-излучение объекта и фона на матрице фотодетекторов *14* ТВП-модуля *13*. Она преобразует изображение в электрический сигнал, обрабатываемый в электронном блоке (ЭБ) *15*, и передается в OLED-дисплей *16*. Изображение с его экрана через призму *17* линзу, линзу *19*, гипотенузную грань *20* куб-призмы *21*, линзу *22*, призму *23*, линзу *24* в куб-призму *3*, отражается от её гипотенузной грани *25* и передается в окуляр *4*. В настоящее время разработана принципиальная схема ПНВ и выполнено его макетирование.

УДК 535(06)+004(06)

А.Е. НЕВАЕВ, Е.А. ЧИПИЗУБОВА
Новосибирский авиационный технический колледж им. Б.С. Галущака

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ В ПРИБОРЕ НОЧНОГО ВИДЕНИЯ ЗА СЧЁТ ДИХРОЧНОГО ЗЕРКАЛА

Приборы ночного видения уже несколько десятилетий занимают важную роль в оптическом приборостроении. В работе представлено усовершенствование оптической схемы за счёт использования дихроичного зеркала.

A.E. NEVAEV, E.A. CHIPIZUBOVA
Novosibirsk Aviation Technical College named after B.S. Galushchak

IMPROVING IMAGE QUALITY IN A NIGHT VISION DEVICE WITH A DICHROME MIRROR

Night vision devices have played an important role in optical instrumentation for several decades. This paper presents an improvement in the optical design through the use of a dichroic mirror.

Дихроичное зеркало представляет собой стеклянную подложку с нанесенной многослойной диэлектрической структурой, которая за счёт эффекта интерференции отражает только одну длину волны.

Дихроичное зеркало в приборе ночного видения – важный компонент, отвечающий за обеспечение оптимальной передачи и отражения световых волн при использовании данного прибора. Эта технология позволяет получить высококачественное изображение в условиях слабой освещённости или полной темноты.

Основным принципом работы дихроического зеркала является использование его свойства пропускать или отражать световые волны в зависимости от их определенной длины. Таким образом, с помощью данного зеркала удается отфильтровать или усилить нужные кусочки электромагнитного спектра.

В приборе ночного видения, такое зеркало позволяет отделить инфракрасные волны от видимого света. Это особенно важно, поскольку инфракрасное излучение, генерируемое предметами исследования, не видно невооруженным глазом. Однако оно может быть обнаружено и преобразовано в видимый сигнал с помощью детекторов инфракрасного излучения.

Дихроичное зеркало в приборе ночного видения также обеспечивает оптимальное использование доступного света или инфракрасного излучения. Оно способно отражать нужную длину волны, уменьшая потери световой энергии и повышая общую чувствительность прибора.

Ещё одно важное преимущество дихроичного зеркала заключается в его прозрачности для остальных спектральных компонентов. Это означает, что, в то время как инфракрасные волны отображаются и преобразуются в видимую форму, другие виды светового излучения продолжают проходить через зеркало без значительных потерь. Это обеспечивает точность и надежность при передаче и обработке изображения.

Таким образом, дихроичное зеркало в приборе ночного видения является важным элементом, обеспечивающим высокое качество и эффективность системы. Благодаря его свойствам фильтрации и отражения, прибор обеспечивает оперативную и точную передачу визуальной информации в условиях недостаточного освещения. В результате можно получить ясное и четкое изображение объектов даже в полной темноте, что делает эту технологию незаменимой при выполнении различных задач – от наблюдения за окружающей средой до специальных операций и деятельности в сложных условиях.

Компоновка оптической схемы прицела ночного видения с дихроичным зеркалом. Объектив предназначен для получения перевернутого увеличенного изображения наблюдаемого объекта, состоит из передней и задней части. Электронно-оптический преобразователь (ЭОП) III поколения. Дихроичное зеркало установлено между ЭОПом и сеткой. За ним установлена сетка с подсветкой, после сетки с подсветкой устанавливается окуляр, через который мы наблюдаем изображение. Окуляр представляет собой многолинзовую конструкцию и предназначен для рассматривания увеличенного прямого изображения цели и прицельной сетки.

Таким образом в данной работе проведено исследование дихроичного зеркала в прицеле ночного видения, назначение, структура, принцип работы, сделана компоновка прибора с исследуемым компонентом. В процессе проведения работы было принято решение о дальнейшем усовершенствовании конструкции прибора.

Список литературы

1. Степанов Е. В., Миляев В.А. // Квантовая электроника. 2002. Т. 32. №11.

2. Бардин А.Н. Сборник и юстировка оптических приборов. Высшая школа, 2005..

3. Кривовяз Л.М., Пуряев Д.Т., Знаменская М.А. Практика оптической измерительной лаборатории. Машиностроение, 2004.

В.Г. ВОЛКОВ, П.Д. ГИНДИН, В.В. КАРПОВ, С.А. КУЗНЕЦОВ
АО «Московский завод «Сапфир», Москва

ТРЁХСПЕКТРАЛЬНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ОСВЕТИТЕЛЬ

Рассматривается мощный импульсный лазерный осветитель с функцией измерения дальности, работающий на длинах волн 0,85, 0,9, 1,55 мкм.

V.G. VOLKOV, P,D, GINDIN, V.V. KARPOV, S.A. KUZNETSOV
JSC «Moscow Plant «Sapphire», Moscow

THREE-SPECTRAL PULSED LASER ILLUMINATOR

A powerful pulsed laser illuminator with a range measurement function operating at wavelengths of 0.85, 0.9, 1.55 microns is considered.

В активно-импульсных приборах ночного видения используются импульсные лазерные осветители (ИЛО). Но при этом ИЛО не может быть использован в качестве дальномера. Поэтому предлагается новый ИЛО. Его блок-схема дана на рис. 1, а его внешний вид – на рис. 2.

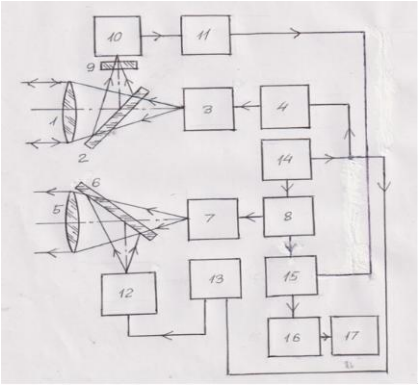


Рис. 1. Блок-схема ИЛО



Рис. 2. Внешний вид ИЛО

Задающий генератор импульсов (ЗГИ) *14* со своего первого выхода запускает первый блок накачки *4* и третий блок накачки *13*. Первый блок накачки *4* запускает первый импульсный лазерный полупроводниковый излучатель (ИЛПИ) *3*. Его излучение проходит через первое дихроичное плоское зеркало (ДПЗ) *2* и коллимируется первым объективом формирования излучения (ОФИ) *1* на длине волны 0,85 мкм. Третий блок накачки *13* запускает третий ИЛПИ *12*. Его излучение отражается от второго ДПЗ *6* и коллимируется вторым ОФИ *5* на длине волны 0,9 мкм. Поскольку оптические оси ОФИ *1* и ОФИ *5* взаимно параллельны, то оба пятна подсвета совпадают друг с другом, усиливая таким образом мощность излучения подсвета. ЗГИ *14* со своего второго выхода запускает второй блок накачки *8*. Он запускает второй ИЛПИ *7*. Он излучает на длине волны 1,55 мкм. При этом со второго выхода второго блока накачки *8* синхроимпульсы подаются на первый вход схемы сравнения *15*. Это излучение проходит через второе ДПЗ *6* и коллимируется вторым ОФИ *5*. Он излучает на длины волны 1,55 мкм. Импульсы излучения, отражённые от объекта, приходят в первый ОФИ *1*, отражаются от первого ДПЗ *2* и проходят через узкополосный фильтр *9*, в то время как первый ОФИ создаёт изображение на длине волны 1,55 мкм на фотоприёмном устройстве (ФПУ) *10*. Его выходной сигнал усиливается в усилителе *11*. Сигнал с его выхода поступает на второй вход схемы сравнения *15*. При этом со второго выхода второго блока накачки *8* синхроимпульсы подаются на первый вход схемы сравнения *15*. В ней формируется разность этих двух сигналов. Она поступает в измеритель временных интервалов (ИВИ) *16*, преобразуется в цифровой сигнал, пропорциональный дальности и вводимый в светодиодный индикатор дальности (СИД) *17*. В настоящее время разработана принципиальная схема ИЛО и выполнено его макетирование.

М.К. БРАЖНИКОВ[1,2], С.Н. БЕЗДИДЬКО[1]
[1]Московский государственный университет геодезии и картографии
[2]Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская обл.

СИНТЕЗ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ: СОВРЕМЕННЫЕ АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Синтез и проектирование оптических систем являются сложными и многогранными задачами, требующими применения современных алгоритмов и программного обеспечения. В последние годы наблюдается значительное развитие в этой области, что позволяет улучшить процесс проектирования и повысить качество создаваемых оптических систем.

M.K. BRAZHNIKOV[1,2], S.N. BEZDIDKO[1]
[1]Moscow State University of Geodesy and Cartography
[2]Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radioengineering, Mendeleevo, Moscow region

SYNTHESIS AND DESIGN OF OPTICAL SYSTEMS: MODERN ALGORITHMS AND SOFTWARE

The synthesis and design of optical systems are complex and multifaceted tasks that require the use of modern algorithms and software. In recent years, there has been significant development in this area, which makes it possible to improve the design process and improve the quality of optical systems being created.

Синтез оптических систем представляет собой процесс разработки оптических систем с необходимыми габаритными, светотехническими, аберрационными, технологическими, эксплуатационными и стоимостными параметрами. Основная цель синтеза заключается в создании конструкции, которая удовлетворяет требованиям технического задания и является хорошим решением для дальнейшей параметрической оптимизации. Синтез оптических систем включает в себя поиск структуры и габаритных параметров исходной схемы, что осуществляется на основе гауссовой оптики и теории аберраций. В процессе синтеза вводятся необходимые условия на параметры схемы, которые должны быть выполнены для удовлетворения технических требований. Основные проблемы, с которыми сталкиваются разработчики, включают

зависимость от опыта проектировщика и отсутствие этапа синтеза в существующем программном обеспечении, что приводит к неэффективности.

В решении этих проблем может помочь разработка новых методов и алгоритмов для синтеза оптических систем, основанных на использовании аналитических методов параксиальной оптики, теории аберраций третьего порядка и эвристических критериев. Эти подходы позволяют строить предварительные оптические системы, что способствует повышению формализации процесса проектирования и эффективности оптических расчётов. Также стоит отметить необходимость в разработке принципиально новых программ оптимизации. Новые программы оптимизации обладают уменьшенной локальной ограниченностью и способны находить "псевдоглобальные" решения, что сокращает сроки оптимизации и улучшает качество изображения за счёт уменьшения аберраций высших порядков. Использование теории ортогональных аберраций позволяет разделить вклад аберраций различных порядков в ухудшение качества изображения и выявить фундаментальные свойства аберраций, что способствует улучшению процесса оптимизации. Также разработка методов для оценки коррекционных возможностей оптических систем и определения их предельных возможностей помогает в анализе и улучшении проектирования.

Таким образом, современные алгоритмы и программное обеспечение играют ключевую роль в улучшении процесса синтеза и проектирования оптических систем, однако остаются нерешённые задачи, такие как автоматизация начального этапа синтеза и улучшение методов оптимизации.

Список литературы

1. Bezdidko S.N. New principles of synthesis and optimization of optical systems using a computer // International Optical Design Conference. Optica Publishing Group, 1994. P. DMTSG16.

2. Грамматин А.П. Методы синтеза оптических систем. Учебное пособие. СПб: ГИТМО (ТУ), 2002.

3. Bezdidko S.N. New principles of optical system synthesis // Proc. SPIE. 1995. V. 2539. P. 208-211.

4. Бездидько С.Н., Ширанков А.Ф. Структурно-габаритный синтез исходных схем оптических систем // Оптический журнал. 2019. Т. 86. № 9. С. 17-24.

5. Джеррард А., Берч Дж.М. Введение в матричную оптику. М.: Мир, 1978.

6. Ezhova K., Zverev V., Van Luen N. Analysis of the quality of the image formed by the zoom-lens optical system based on the use MATLAB and ZEMAX // Proc. SPIE. 2015. V. 9626. P. 793-799.

УДК 535(06)+004(06)

Е.Ю. ЛЕТОВА, Т.В. ИВАНОВА, Д.С. ЗАВГОРОДНИЙ[1]
Университет ИТМО, Санкт-Петербург
[1]АО «ЛОМО», Санкт-Петербург

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ И УЧЁТ КОНЕЧНОГО РАЗМЕРА ТЕСТ-ОБЪЕКТА ПРИ РАСЧЁТЕ ХАРАКТЕРИСТИК КАЧЕСТВА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО КОНТРОЛЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В работе рассмотрены методы предварительной обработки изображений точечных тест-объектов для последующего вычисления функций передачи модуляции и концентрации энергии. В том числе показан способ учёта конечного размера тест-объекта при расчёте характеристик качества. Также проанализировано влияние методов устранения паразитного фона, шума фотоприёмника и компенсации размера тест-объекта на итоговую погрешность результатов аттестации оптических приборов.

E.Yu. LETOVA, T.V. IVANOVA, D.S. ZAVGORODNIJ[1]
ITMO University, Saint-Petersburg
[1]JSC «LOMO», Saint-Petersburg

IMAGE PREPROCESSING AND TEST OBJECTS FINITE SIZE COMPENSATION FOR QUALITY CHARACTERISTICS CALCULATION IN PRODUCTION TESTING OF OPTICAL SYSTEMS

The paper discusses pinhole object images preprocessing methods for the modulation transfer function and energy concentration function calculation. The test object finite size compensation method for the quality characteristics calculation is also shown. The background and photodetector noise suppression, and test object size compensation methods influence on the optical instruments quality assessment results final error is also analyzed.

В настоящее время точный контроль качества создаваемых оптических систем является неотъемлемой частью оптического производства. Одним из наиболее распространённых методов оценки качества оптики является контроль по изображениям функций рассеяния точки (ФРТ). В зависимости от типа и назначения оптических систем при контроле используются функция передачи модуляции (ФПМ) и функция концентрации энергии (ФКЭ) [1]. При этом результаты анализа

рассчитанных характеристик качества сильно зависят от предварительной обработки зарегистрированных изображений, в том числе от алгоритмов компенсации конечного размера используемых точечных диафрагм.

На первом этапе предварительной обработки область за пределами видимой части пятна рассеяния подвергается медианной фильтрации, которая хорошо устраняет высокочастотный хаотичный шум и делает величину фоновой составляющей на краях матрицы близкой к константе. Следующим наиболее важным этапом является устранение фона методом многократного вычитания. На каждой итерации величина фона рассчитывается как среднее значение интенсивности пикселей на краях изображения и вычитается из интенсивностей всех пикселей изображения.

В случае использования изображений точечных диафрагм конечных размеров ФПМ и ФКЭ необходимо вычислять с учётом размера предмета. Для этого рассчитывается отношение фурье-образа зарегистрированного изображения к фурье-образу предмета заданного размера [2, 3]. Важно отметить, что при компенсации может происходить деление на близкие к нулю величины, из-за чего значения скомпенсированной ФПМ стремятся к бесконечности, что противоречит её физическому смыслу. Такие численные ошибки можно исправить при помощи интерполяции. В тех точках, где делитель выражения стремится к нулю, значение скомпенсированной ФПМ не задаётся. Пропущенные точки заполняются рассчитанными при помощи билинейной интерполяции значениями.

Для учёта размера предмета при вычислении ФКЭ сперва нужно скомпенсировать ФРТ, используемую для расчёта концентрации энергии. ФРТ с учётом размера можно получить обратным преобразованием Фурье скомпенсированной ФПМ. Благодаря проведённой интерполяции пропущенных значений ФПМ удаётся без значительных искажений восстановить ФРТ, и, следовательно, учесть размер предмета для ФКЭ.

Таким образом, в результате работы выявлены оптимальные методы предварительной обработки и параметры их использования. Также показаны методы учёта конечного размера предмета, благодаря которым удаётся компенсировать достаточно большие размеры тест-объектов, не увеличивая погрешность вычислений характеристик качества и не ограничивая область анализа ФПМ.

Список литературы

1. Ivanova T.V., Letova E.Yu., et al. // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2021. V. 21. P. 334-341.

2. Letova E.Yu. // Almanac of Research Papers of Young Scientists of ITMO University. 2023.

3. Letova E.Yu. // XI Congress of Young Scientists. Collection of scientific papers. 2022. V. 1. P. 637-640.

УДК 535(06)+004(06)

А.П. ЛАВРОВ, С.И. ИВАНОВ
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ В МНОГОМОДОВОМ ВОЛОКНЕ ПРИ ПРОСТРАНСТВЕННОМ ШУМЕ НА ЕГО ВХОДЕ

Представлены результаты численного моделирования процесса установления пространственного распределения излучения в многомодовом волокне при его возбуждении шумовым распределением.

A.P. LAVROV, S.I. IVANOV
Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

FORMATION OF SPATIAL DISTRIBUTION IN MULTIMODE FIBER EXCITED BY SPATIAL NOISE DISTRIBUTION

The results of numerical modeling of formation the spatial distribution of radiation in a multimode fiber when it is excited by a noise distribution are presented.

Модель волновода – осесимметричная структура с показателем преломления среды n и в ней сформирована сердцевина с диаметром d и показателем преломления $n + \Delta n(r)$. Рассматриваются профили сердцевины как градиентный $\Delta n(r) = \Delta n \cdot [1–(2r/d)^2]$, так и ступенчатый $\Delta n(r) = \Delta n$. На оси Δn составляет 1 или 2 % от показателя среды n. При заданной комплексной амплитуде (КА) монохроматического излучения $E_{in}(x, y)$ на торце волокна ($z = 0$) рассчитываются её изменения $E(x, y, z)$ в последующих сечениях $z > 0$. Метод расчёта – пошаговый split-step метод с малым шагом dz. Неоднородность структуры учитывается как возмущение фазы $\Delta\varphi(r) = 2\pi\Delta n(r)\mathrm{d}z/\lambda$ для КА $E(x, y, z)$ а затем по возмущённой КА выполняется расчёт $E(x, y, z+\mathrm{d}z)$ в оптическом пакете GLAD на основе концепции плоских волн [1].

Ниже приведены некоторые результаты расчетов при таких параметрах: $\lambda = 0{,}8$ мкм, $n = 1.467$, на оси волновода $\Delta n = 0{,}15$ и $0{,}3$, волновод без потерь, диаметр сердцевины $d = 50$ мкм, диаметр оболочки $D = 125$ мкм, что учитывалось по схеме, когда на каждом шаге dz обнулялись значения $E(x, y)$ вне оболочки ($r > D/2$), шаг $\mathrm{d}z = 0{,}8$ мкм. Входное шумовое распределение $E_{in}(x, y)$ формировалось с гауссовым пространственным спектром с разными радиусами корреляции R_c, размер апертуры XY в расчётах составлял 500 x 500 мкм^2.

На рис. 1 приведены примеры распределений $E(x, y)$ (в виде $|E(x, y)|^2$) на расстоянии $z = 824$ мкм при $\Delta n = 0{,}15$ для градиентного (слева) и ступенчатого (справа) волокон при одинаковом входном распределении $E_{in}(x, y)$, $R_c = 1{,}41$ мкм. Процесс установления «стационарного модового состава» характеризует коэффициент корреляции $C(z, \Delta z)$ распределений $E(x, y, z)$ и $E(x, y, z+\Delta z)$. На рис. 2 приведено изменение модуля $|C(z)|$ при $\Delta z = 4dz$ для трёх волокон. Можно заключить, что моды устанавливаются достаточно быстро на расстояниях $z \approx 1$ мм даже при «сложном» входном возбуждении. Рис. 3 иллюстрирует рассеяние излучения высших мод: показано изменение общей мощности излучения $P(z)$ (в круге с $D = 125$ мкм) для градиентных волноводов с $\Delta n = 0{,}15$ (1) и $\Delta n = 0{,}3$ (2) при одинаковой мощности $P = 5$ мВт на входе (в апертуре XY, $z = 0$).

Полученные в расчётах результаты позволяют прояснить «физически» характер распространения излучения в многомодовых волноводах, а также показывают большие возможности пакета GLAD.

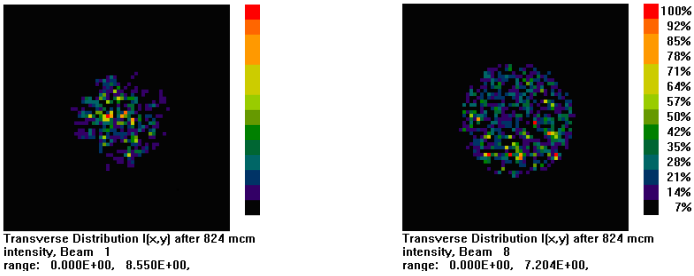


Рис. 1. Распределения интенсивности в градиентном и ступенчатом волокнах

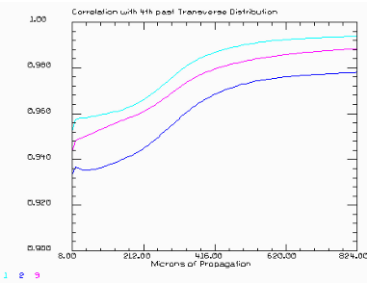


Рис. 2. Изменение модуля $C(z)$

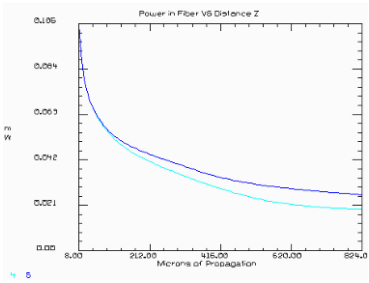


Рис. 3. Изменение мощности в волноводе

Список литературы

1. General Laser Analysis and Design, https://aor.com.

УДК 535(06)+004(06)

В.И. БУСУРИН, А.Н. ТЮНИН, М.А. ЖЕГЛОВ[1], С.О. ВАСЕЦКИЙ[1]
Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)
[1]*Государственный научно-исследовательский институт приборостроения, Москва*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРЕНИЯ НА ОСНОВЕ СВЯЗАННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ

В работе представлены результаты разработки макета преобразователя линейного ускорения на основе связанных оптических волноводов. В результате эксперимента получены следующие параметры: перепад мощности на выходах связанных оптических волноводов и нелинейность выходного сигнала преобразователя от прилагаемого линейного ускорения.

V.I. BUSURIN, A.N. TYUNIN, M.A. ZHEGLOV[1], S.O. VASETSKIY[1]
Moscow Aviation Institute (National Research University)
[1]*State Research Institute of Instrument Engineering, Moscow*

EXPERIMENTAL STUDY OF A LINEAR ACCELERATION CONVERTER BASED ON COUPLED OPTICAL WAVEGUIDES

The paper presents the results of developing a prototype of a linear acceleration converter based on coupled optical waveguides. The following parameters were obtained as a result of the experiment: power difference at the outputs of coupled optical waveguides and nonlinearity of the converter output signal from the applied linear acceleration.

Рассматривается преобразователь линейного ускорения, использующий связанные оптические волноводы как основной элемент для измерения входного воздействия, в котором обеспечивается взаимодействие двух волноводов. Использование оптических волокон в качестве чувствительного элемента обеспечивает высокую защищённость от электромагнитных помех.

Произведено экспериментальное исследование преобразователя линейного ускорения на основе связанных оптических волноводов. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Чувствительный элемент в виде связанных оптических волноводов располагается на воспринимающем элементе, обеспечивающий чувствительность к линейному ускорению *a*. Под влиянием линейного ускорения *a*

воспринимающий элемент смещается относительно основания, что приводит к растяжению или сжатию связанных оптических волноводов. Это приводит к изменению показателя преломления материала, что в свою очередь влияет на распространение света в волноводах и на коэффициент связи между связанными оптическими волноводами [1]. Оптическое излучение $P_{вх}$ источника вводится в один из связанных оптических волноводов. В результате воздействия линейного ускорения изменяются значения мощности на выходах связанных оптических волноводов P_1 и P_2. Выходной сигнал преобразователя $U(a)$ получается путем преобразования оптических сигналов P_1, P_2 в электрические напряжения U_1, U_2 и их взаимного вычитания.

В экспериментальной установке (рис. 1) в качестве чувствительного элемента использован сплавной разветвитель 1 х 2 с диаметром сердцевины 10 мкм, длиной зоны взаимодействия 5 мм, материалом сердцевины – кварцевым стеклом, с показателем преломления 1,451, материалом оболочки – кварцевым стеклом, легированным фтором, с показателем преломления 1,423. Источником оптического излучения являлся одномодовый полупроводниковый лазерный модуль FPL-1550-8DL, в качестве фотодиодов использовались PDM-14-2K-InGaAs.

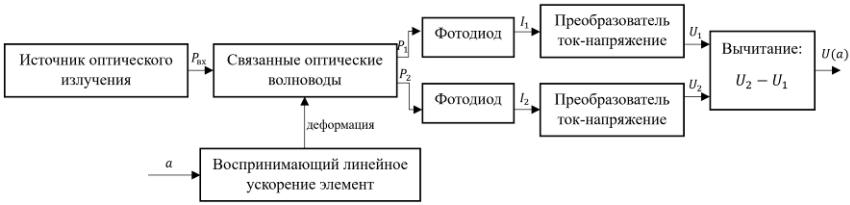


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

В результате эксперимента получены следующие значения параметров: перепад мощности на выходах связанных оптических волноводов составил 21 % и нелинейность функции преобразования составила менее 0,5 % при измерении линейного ускорения в диапазоне ± 10 g.

Список литературы

1. Xin C., Xu Y., Zhang Z., Li M. Micro-opto-electro-mechanical systems for high-precision displacement sensing: A Review // Micromachines. 2024. V. 15. P. 1011.

УДК 535(06)+004(06)

А.С. БЕЛОУСОВА, В.М. КОТОВ, С.В. АВЕРИН
Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

ДВУМЕРНАЯ ОБРАБОТКА ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЛЬТРА ИЗ TeO_2, РАБОТАЮЩЕГО НА МИНИМАЛЬНОЙ ЧАСТОТЕ ЗВУКА

Рассмотрено двумерное выделение контура изображения с использованием акустооптического фильтра, работающего на минимальной частоте звуковой волны, распространяющейся в TeO_2 ортогонально оптической оси кристалла. Показано, что дифракция является широкоапертурной, а передаточные функции нулевого и первого дифракционных порядков – осесимметричные. С увеличением частоты звука начинают формироваться высшие брэгговские порядки, при этом осесимметричность функций нарушается.

A.S. BELOUSOVA, V.M. KOTOV, S.V. AVERIN
Fryazino branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS

TWO-DIMENSIONAL PROCESSING OF OPTICAL IMAGES USING A TeO_2 FILTER OPERATING AT A MINIMUM ACOUSTIC FREQUENCY

A two-dimensional image edge enhancement using an acousto-optic filter operating at the minimum frequency of a sound wave propagating in TeO_2 orthogonally to the optical axis of the crystal is considered. It is shown that diffraction is wide–aperture, and the transfer functions of the zero and first diffraction orders are axisymmetric. With an increase in the frequency of sound, higher Bragg orders begin to form, while the axisymmetric of the functions is violated.

Акустооптические (АО) пространственные фильтры широко используются для обработки двумерных изображений. В качестве АО-среды наиболее часто выбирается кристалл парателлурита (TeO_2), обладающий уникальными оптическими и акустическими свойствами [1]. В частности, для осуществления АО-дифракции на звуковой волне, распространяющейся ортогонально оптической оси TeO_2, требуется мощность звука, в 1200 раз меньшая, чем мощность при использовании эталонного кристалла кварца. Для увеличения разрешающей способности необходимо понижать частоту звуковой волны [2]. Нами был найден режим с минимальной частотой. Более того оказалось, что дифракция на

минимальной частоте является широкоапертурной. Это даёт возможность наилучшим образом осуществлять двумерную фильтрацию изображения в процессе его оптической фурье-обработки.

На рис. 1 приведены фотографии изображений, получаемых на экране после оптической фурье-обработки, на частоте звука 9.95 МГц. Длина волны оптического излучения – 0.63 мкм. Видно, что в первом порядке формируется отчетливый двумерный контур изображения нулевого порядка. При изменении мощности звука, наоборот, можно получить контур изображения в нулевом порядке дифракции. На рис. 2 приведены фотографии появления высших дифракционных порядков с увеличением частоты звука. На частотах звука 9.95 и 18.2 МГц наблюдаются только два порядка – 0-й и 1-й, а на частоте звука 22.8 МГц появляются в дополнение ещё 3-й и 4-й порядки дифракции.

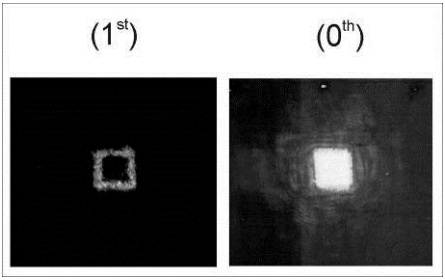


Рис.1. Фотографии изображений после фурье-обработки, наблюдаемых на экране в первом (1^{st}) и нулевом (0^{th}) дифракционных порядках на частоте звука 9.95 МГц

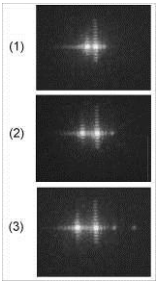


Рис .2. Дифракционная картина, наблюдаемая на экране, полученная на частотах звука 9.95 МГц (1), 18.2 МГц (2) и 22.8 МГц (3)

Работа выполнена в рамках Государственного Задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Список литературы

1. Балакший В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики. М.: Радио и Связь, 1985

2. Балакший В.И. // Радиотехника и электроника. 1984. № 8. С. 1610-1616.

УДК 535(06)+004(06)

С.А. РОГОВ, Т.А. КОТОВ
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

О РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОГЕРЕНТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ АНАЛИЗАТОРОВ СПЕКТРА С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ ИНТЕГРИРОВАНИЕМ

Рассматривается разрешающая способность когерентных оптических анализаторов спектра с пространственным интегрированием, которая для некоторых систем должна определяться с учётом когерентной добавки в выходном сигнале спектроанализатора, в отличие от разрешающей способности по критерию Рэлея.

S.A. ROGOV, T.A. KOTOV
The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications

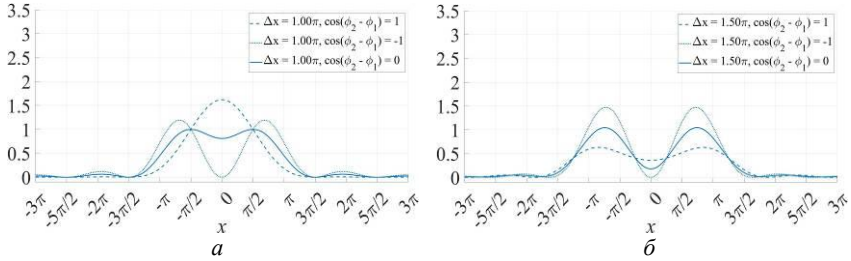
ON THE RESOLUTION OF COHERENT OPTICAL SPECTRUM ANALYZERS WITH SPATIAL INTEGRATION

The resolving power of coherent optical spectrum analyzers with spatial integration is considered, which for some systems must be determined taking into account the coherent additive in the output signal of the spectrum analyzer, in contrast to the resolving power according to the Rayleigh criterion.

При определении разрешающей способности оптических анализаторов спектра с пространственным интегрированием обычно используется критерий Рэлея [1], согласно которому два гармонических сигнала считаются разрешимыми, если максимум пространственного спектра сигнала одной частоты совпадает с первым минимумом спектра сигнала второй частоты. В когерентных анализаторах спектра с пространственным интегрированием на выходе регистрируется интенсивность спектра суммы входных сигналов, которая отличается от суммы интенсивностей спектров первого и второго сигналов, используемых в критерии Рэлея на дополнительное интерференционное слагаемое, зависящее от разности начальных фаз входных сигналов. Из-за этой добавки может измениться или вообще пропасть провал между максимумами спектров гармоник, используемый как признак разрешения по критерию Рэлея, как показано на рис. 1.

Если разность фаз входных сигналов быстро меняется, как например, в акустооптических анализаторах спектра, интерференционная добавка в спектре может усредняться за время его регистрации, при этом для определения разрешающей способности вполне подходит критерий Рэлея. При использовании для ввода сигналов других пространственных модуляторов света, например, жидкокристаллического [2], во время регистрации спектров разность фаз не изменяется, поэтому для определения разрешающей способности таких спектроанализаторов нужно учитывать интерференционную добавку в спектре.

На рис. 1 приведён вид выходных сигналов когерентного оптического спектроанализатора при разной величине расстояния между максимумами спектров двух входных частот $\Delta\zeta$ (отложенных в масштабе: $\Delta x = \pi X \Delta\zeta$, где X – длительность входных сигналов) для трёх значений множителя когерентной добавки $\cos(\varphi_2 - \varphi_1)$, равных 1, 0 и -1. Графики при $\Delta x = \pi$, представленные на рис. 1*а*, соответствуют разности частот по критерию Рэлея. Кривые, построенные для других значений разности частот показывают, что, начиная с величины Δx больше, чем примерно $1{,}5\pi$ (рис. 1*б*), при любом значении косинуса провал между максимумами не превышает 0,8 от их величины, как при использовании критерия Рэлея. Если в анализаторе спектра регистрировать выходные сигналы при разной величине $\varphi_2 - \varphi_1$, то возможно получение сверхразрешения двух частот, так как при $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = -1$ между максимумами всегда наблюдается провал до нулевого уровня.



а *б*

Рис. 1. Вид выходных сигналов когерентного оптического спектроанализатора

Список литературы

1. Ли Дж.Н., Вандерлугт Э. // ТИИЭР. Т. 77. № 10. С. 158-193.
2. Кузьмин М.С., Рогов С.А. // Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 3. С. 23-29.

УДК 535(06)+004(06)

С.К. КРУГЛОВ, А.В. ЛУПИН
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПОЛУЧЕНИЕ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИХ СНИМКОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В МЕТАЛЛЕ

Рассматриваются задачи рентгенографического анализа напряжённостей в металлах. Предложены аппаратные и программные инструментальные средства для получения и исследования рентгенографических снимков. Реализация системы для экспресс-анализа выполнена на базе линейного ПЗС и SoC (системы на кристалле).

S.K. KRUGLOV, A.V. LUPIN
Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

OBTAINING AND PROCESSING X-RAY FILM FOR MEASURING INTERNAL STRESSES IN METAL

The problems of X-ray analysis of stresses in metals are considered. Hardware and software tools for obtaining and examining X-ray images are proposed. The implementation of the system for express analysis is based on linear CCD and SoC (systems on a chip).

Для измерения внутренних напряжений в металле используют различные методы, например, рентгенографический (рентгено-дифракционный) метод, основанный на прецизионном измерении изменений межплоскостных расстояний, определяемых по смещению дифракционной линии. Метод позволяет определять напряжения в деталях сложной геометрической формы, исследовать напряжения на малых участках поверхности образца [1]. Для регистрации отражённых лучей используется фотоплёнка.

В работе рассматриваются аппаратные и программные инструментальные средства для исследования снимков. Анализ снимков (кадров) производится с помощью линейных приборов с зарядовой связью (ЛПЗС).

Для экспресс-анализа создан переносной макет прибора на базе ЛПЗС и платы с микропроцессором для анализа снимков с тензометра [2]. Для обеспечения исследований характеристик объектов решено было применить платы с функцией «система на кристалле» (SoC) – отладочный

модуль Xilinx Zynq-7000 SoC ZC702 [3]. Его возможности были проверены авторами на других задачах [4]. Модуль содержит двухъядерную вычислительную подсистему на базе ARM CortexA9, программируемую логику и блоки ввода/вывода.

Разработана методика и создано программное обеспечение для ввода изображения с ЛПЗС в память модуля, и проведения его анализа,

Задача управления и обработки изображения была разделена на эти два устройства. Схема создана на языке SystemVerilog, программы для микропроцессора – на языке Си.

Для представленной в работе применяемой технологии исследований на начальном этапе, на рис. 1 приведён вид рентгенограммы, где 2 и 4 – линии эталона при углах 0 и 47 °, 1 и 3 – линии металла при углах 0 и 47 °.

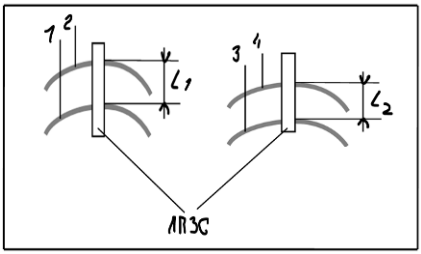


Рис. 1. Вид рентгенограммы

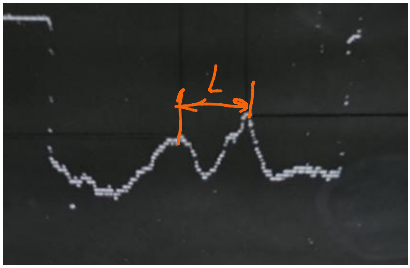


Рис. 2. Изображение с ЛПЗС

На рис. 2 представлено изображение, полученное после оцифровки с ЛПЗС. На этапе экспресс-анализа оценивается «валидность» кадра (проведённого эксперимента).

На втором этапе исследования проводятся на компьютере, для чего разработана библиотека программ для анализа изображения и оценки величины положения пиков L, L1, L2, привязки к объекту, и других.

Удовлетворительные результаты использования тензометров получены на предприятиях «Газпрома», «Ленэнерго», ОАО «Северсталь».

Список литературы

1. Брандон Д., Каплан У. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. М.: Техносфера, 2004.

2. Трофимов В.В., Башкарев А Я., Краус И. Рентгеновская тензометрия это так просто // В мире неразрушающего контроля. 2005. № 1 (27). С. 28-32.

3. ZC702 Evaluation Board for the Zynq-7000 XC7Z020 SoC User Guide UG850 (v1.7). 2019.

4. Круглов С.К., Лупин А.В. Динамическое управление режимами работы матричной камеры на основе «системы на кристалле» // XIII международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сбор. научн. тр. М.: НИЯУ МИФИ, 2024. С. 583-584.

И.В. ГАЛАКТИОНОВ[1,2], В.В. ТОПОРОВСКИЙ[1,2]
[1]*Московский технический университет связи и информатики*
[2]*Институт динамики геосфер им. М.А. Садовского РАН, Москва*

ВИЗУАЛИЗАТОР ИНДИКАТРИС РАССЕЯНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МИ И ХЕНЬИ–ГРИНШТЕЙНА

Представлено разработанное программное обеспечение для визуализации индикатрис рассеяния монохроматического излучения видимого диапазона на сферических диэлектрических частицах.

I.V. GALAKTIONOV[1,2], V.V. TOPOROVSKY[1,2]
[1]*Moscow Technical University of Communications and Informatics*
[2]*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of the RAS, Moscow*

SOFTWARE TOOL FOR VISUALISATION OF MIE AND HENYEY–GREENSTEIN SCATTERING PHASE FUNCTIONS

The developed software for visualization of scattering phase functions of monochromatic radiation in the visible range on spherical dielectric particles is presented.

Среда считается рассеивающей или мутной, если она обладает явно выраженной оптической неоднородностью. Можно выделить несколько причин оптической неоднородности среды [1, 2]: присутствие примесей посторонних частиц с показателем преломления, отличающимся от показателя преломления среды; флуктуации концентрации посторонних частиц, флуктуации пространственной ориентации частиц [3].

Индикатриса рассеяния – это функция плотности вероятности рассеяния в направлении s’ фотона, движущегося в направлении s, то есть функция, характеризующая элементарный акт рассеяния. Иными словами, индикатриса – это угловое распределение силы света, рассеянного элементарным объёмом [4 - 6]: $I = p(\varphi)/p$, где $p(\varphi)$ – доля излучения, рассеянного в направлении φ, p – рассеянное элементарным объёмом в телесный угол 4π.

Программное обеспечение для визуализации индикатрис рассеяния [7, 8] было реализовано на языке C# (технология Windows Forms) под

платформу .NET Framework 4.5. Графический интерфейс приложения представлен на рис. 1.

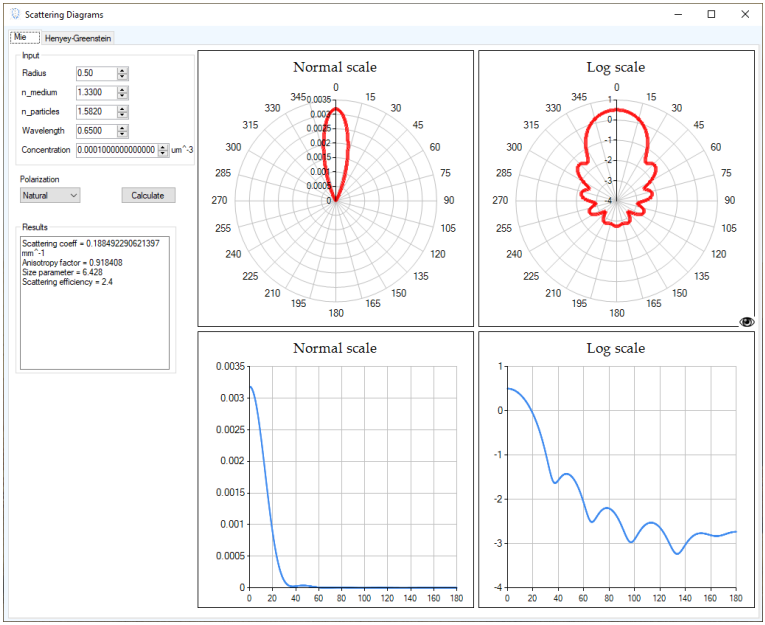


Рис. 1. Графический интерфейс приложения для визуализации индикатрис рассеяния

Приложение имеет две вкладки для расчёта двух индикатрис рассеяния, соответственно; панель ввода параметров (радиус частицы, показатель преломления среды, длину волны излучения, концентрацию частиц), а также панель выходной информации (рассчитанных параметров) и основную панель с графиками индикатрис в полярном и декартовом представлении.

Список литературы

1. Galaktionov I., Kudryashov A., Sheldakova J., et al. // Proc. SPIE. 2019. V. 10886. P. 1088619.
2. Kudryashov A., Rukosuev A., Samarkin V., et al. // Proc. SPIE. 2018. V. 10772. P. 107720V.
3. Грин Х., Лейн В. // Москва, 1972. С. 500.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. 2005. С. 582-583.
5. Mosk A. // Nature Photonics. 2012. V. 6. P. 283.
6. Зеге Э.П. // Минск: Наука и техника, 1985.
7. Nikitin A., Galaktionov I., Sheldakova J., et al. // Proc. SPIE. 2019. V. 10925. P. 109250K.
8. Galaktionov I., Nikitin A., Sheldakova J., et al. // Photonics. 2022. V. 9 (5). P. 296.

УДК 535(06)+004(06)

Б.В. РУМЯНЦЕВ, Е.А. МИГАЛЬ, П.А. ШУЛЫНДИН,
А.В. ПУШКИН, Ф.В. ПОТЁМКИН
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕННОЙ ФОРМЫ ИНТЕНСИВНОГО ТЕРАГЕРЦЕВОГО ИМПУЛЬСА НА ОСНОВЕ ГЕНЕРАЦИИ ВТОРОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ГАРМОНИКИ В ГАЗЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Предложен и апробирован метод восстановления временной формы и спектра импульсного терагерцевого (ТГц) излучения на основе измерения сигнала второй гармоники, генерируемой в газе при двухцветном воздействии ТГц-импульса и инфракрасного фемтосекундного лазерного излучения. Для восстановления спектрально-временной формы ТГц-излучения использована предобученная на синтезированных данных полносвязная нейронная сеть, принимающая на вход измеряемую зависимость сигнала второй гармоники от задержки между инфракрасным и терагерцевым импульсами. Предлагаемый подход может быть использован для характеризации временной формы интенсивного ТГц--поля в области физики сверхсильных световых полей и нелинейной оптики.

B.V. RUMIANTSEV, E.A. MIGAL, P.A. SHULYNDIN,
A.V. PUSHKIN, F.V. POTEMKIN
Lomonosov Moscow State University

MEASUREMENT OF INTENSE TERAHERTZ PULSE WAVEFORM BASED ON SECOND HARMONIC GENERATION IN GASEOUS MEDIUM WITH THE USE OF MACHINE LEARNING

A method of restoring the field waveform and spectrum of ultrafast pulsed terahertz (THz) radiation is proposed and realized. The method is based on measurement of second harmonic signal generated in a gaseous medium under two-color excitation by THz pulse and infrared femtosecond laser radiation. To restore the spectral-temporal form of THz radiation, a fully connected neural network pre-trained on synthesized data was implemented. The neural network takes as input the measured dependence of the second harmonic energy on the temporal delay between infrared and THz pulses. The proposed approach can be used for characterization of the THz field waveform in the area of super strong laser fields and nonlinear optics.

В настоящее время классическим методом характеризации временной формы импульсного терагерцевого (ТГц) излучения является

электрооптическое детектирование (ЭОД) [1]. Данный метод имеет ограничения по максимальной напряжённости поля измеряемого ТГц-излучения на уровне сотен кВ/см, а результаты таких измерений подвержены искажениям за счёт наличия ТГц-резонансов в области 1 - 10 ТГц в кристаллических средах, используемых в данном методе [2]. В связи с этим в рамках данной работы предлагается иной метод, основанный на измерении сигнала ТГц индуцированной второй гармоники фемтосекундного лазерного излучения в присутствии ТГц-поля в газовой среде, не имеющей ТГц-резонансов и, соответственно, не искажающей формы измеряемого ТГц-импульса. Для восстановления спектрально-временной формы ТГц-импульса на основе данного сигнала применяется нейронная сеть, предобученная на синтезированных данных. Показано (рис. 1), что данный подход позволяет добиться восстановления основных особенностей временной формы и спектра ТГц-излучения как в случае синтезированных данных, так и при подаче на вход нейросети экспериментально измеренных временных сигналов второй гармоники при высокой пиковой напряжённости ТГц-поля на уровне 7.5 МВ/см [3].

Работа поддержана грантом РНФ № 25-22-00084. Румянцев Б.В. является стипендиатом фонда развития теоретической физики и математики БАЗИС. Оборудование, использованное в работе, приобретено при поддержке Программы Развития МГУ и Национального Проекта “Наука и Университеты”. Исследование выполнено при поддержке Некоммерческого Фонда развития науки и образования “Интеллект”.

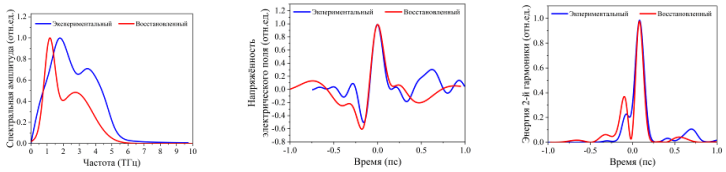


Рис. 1. Сравнение амплитудных спектров (слева) и временных форм (по центру), измеренных в эксперименте на основе ЭОД (синяя линия) и восстановленных с использованием обученной нейросети (красная линия), справа представлен измеренный сигнал (синяя линия) генерируемой в аргоне второй гармоники в зависимости от задержки между ТГц- и ИК-импульсами, по которому производилось восстановление, и восстановленный сигнал (красная линия)

Список литературы

1. Nahata A., Weling A.S., Heinz T.F. // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 69. No. 16. P. 2321-2323.

2. Gallot G., Zhang J., McGowan R.W., Jeon T.-I., Grischkowsky D. // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 74. No. 23. P. 3450-3452.

3. Румянцев Б.В., Пушкин А.В., Сулейманова Д.З., Жидовцев Н.А., Потёмкин Ф.В. // Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики. 2023. Т. 117. № 8. С. 571-579.

УДК 535(06)+004(06)

Г.Р. САГАТЕЛЯН, Е.Р. ПИСКУНОВА, А.Б. СОЛОМАШЕНКО,
О.Л. АФАНАСЬЕВА, А.С. КУЗНЕЦОВ
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЦВЕТОВ НА ОПТИЧЕСКОМ МИКРОСКОПЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦВЕТОВОГО ЭТАЛОНА

Разработана технология определения цвета в автоматическом режиме с помощью оптического микроскопа Zeiss Axio Imager Z.2 Vario. С помощью данного метода удается определять цвета без использования спектрометра. Микроскоп отображает на экране монитора графики, показывающие глубину цвета, на основании которых представляется возможным определять цвета.

G.R. SAGATELIAN, E.R. PISKUNOVA, A.B. SOLOMASHENKO,
O.L. AFANASYEVA, A.S. KUZNETSOV
Bauman Moscow State Technical University

IDENTIFICATION OF COLORS ON AN OPTICAL MICROSCOPE USING A COLOR SRANDARD

The color technology has been developed using the Zeiss Axio Imager Z.2 Vario optical microscope. The method is able to determine colors without spectrometer. The microscope reflects graphs on the monitor screen showing the color depth, on the basis of which it is possible to determine colors.

При проведении оптических исследований, цвета, наблюдаемые непосредственно в микроскоп и отражаемые на экране монитора могут разниться [1]. Это связано с погрешностью, которая возникает из-за ПЗС-матрицы устройства, поэтому для определения цвета микроскоп снабжают спектрометром, по спектрам котором удаётся определять цвета, однако возможным определять цвета и без использования спектрометра. На оптическом микроскопе Zeiss Axio Imager Z.2 Vario (рис. 1*а*) имеется система для настройки изображения (рис. 1*б*), которая показывает глубины цвета. Предлагается идентифицировать цвет по его глубинам в системе RGB, в которой красный цвет имеет координаты (255, 0, 0), зелёный – (0, 255, 0), синий – (0, 0, 255), а белый (255, 255, 255).

Был проведён эксперимент по исследованию цветов из набора светофильтров. Из сравнения диаграммы белого в отражённом и проходящем свете был сделан вывод о том, что осветитель не является идеальным, поэтому координаты белого в системе RGB получаем

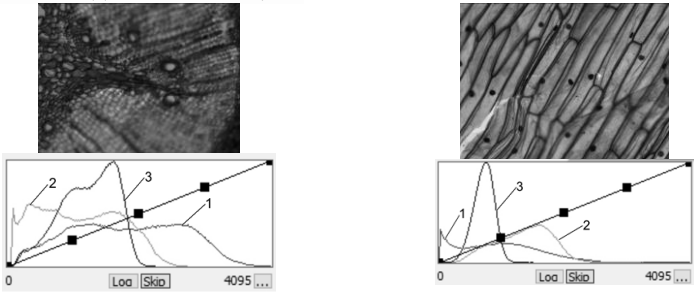
(168, 175, 179). Также получены координаты стёкол ЗС-7 (17, 191, 64), ЗС-8 (64, 188, 133), ЗС-11 (0, 200, 168), ЗС-10 (15, 191, 0), СЗС-22 (0, 49, 168). Координаты цветов были рассчитаны через пропорцию, зная, что максимальная координата цвета 255.



а *б*

Рис. 1. Оптический микроскоп Zeiss Axio Imager Z.2 Vario (*а*), система настройки изображения: кривые для красного (*1*), зелёного (*2*) и для синего (*3*) цветов (*б*)

Аналогичные исследования были проведены на биологических препаратах (рис. 2). При сопоставлении изображения с графиком видно, что превалирующий цвет на графиках соответствует цвету изображения. Препарат «кожица» (рис. 2*а*) описывается координатами (182, 100, 100), то есть наибольшей глубиной обладает красный цвет, а препарат «стебель» (рис. 2*б*) характеризуется координатами (64, 100, 46), то есть наибольшей глубиной обладает зелёный цвет.



а *б*

Рис. 2. Анализ в системе RGB биологических препаратов «кожица» (*а*) и «стебель» (*б*): кривые для красного (*1*), зелёного (*2*) и для синего (*3*) цветов

В разработанном цветовом эталоне [2] насчитывается 98 цветовых полей, благодаря которым аналогичным образом удается распознавать все необходимые цвета препаратов [3].

Список литературы

1. Махов Д.С., Сагателян Г.Р., Самородов А.В. // Измерительная техника. 2021. № 10. С. 60- 63.

2. Сагателян Г.Р., Кондратенко В.С., Пискунова Е.Р., Кузнецов А.С. // Приборы. 2023. № 8. С. 40-43.

3. Годен Ж. Колориметрия при видеообработке. М.: Техносфера, 2008.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. КУЗНЕЦОВА, С.Г. ПРОСКУРИН
Тамбовский государственный технический университет

МАЛОУГЛОВОЕ РАСТРОВОЕ СКАНИРОВАНИЕ ОКТ-ИЗОБРАЖЕНИЙ ОТПЕЧАТКА ПАЛЬЦА ЧЕЛОВЕКА НА РАЗНЫХ ДЛИНАХ ВОЛН

Приведены результаты экспериментов по малоугловому растровому сканированию изображений оптической когерентной томографии отпечатка пальца человека с помощью усовершенствованной быстро сканирующей оптической линии задержки.

A.V. KUZNETSOVA, S.G. PROSKURIN
Tambov State Technical University

SMALL-ANGLE RASTER SCANNING OCT IMAGES OF A HUMAN FINGERPRINT AT DIFFERENT WAVELENGTHS

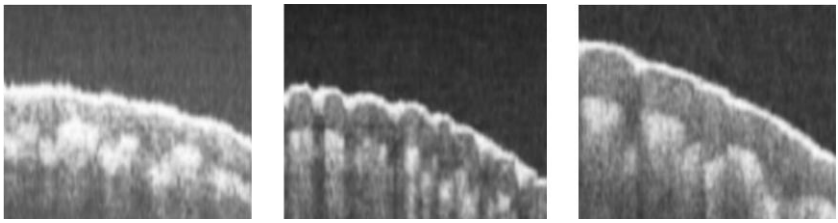
The results of experiments on small-angle raster scanning of images of optical coherence tomography of a human fingerprint using an advanced fast-scanning optical delay line are presented.

Оптическая когерентная томография (ОКТ) – это неинвазивная визуализационная технология, которая использует световые волны для получения высококачественных изображений внутренних структур тканей. В последние годы малоугловое растровое сканирование (МУРС) стало важным инструментом в области ОКТ [1].

В эксперименте в качестве когерентного источника света для получения структурных изображений отпечатка пальца (рис. 1) использовался суперлюминисцентный диод (СЛД), а также применялась улучшенная быстро сканирующая оптическая линия задержки (БСОЛЗ) на следующих длинах волн: 1482, 1298 и 840 нм [2].

Излучение от СЛД на вышеуказанных длинах волн поступает в разветвители светодиодов, потом на опорное плечо и плечо интерферометра. Отражённые лучи от образца и референтного зеркала комбинируются, создавая интерференционное изображение, которое содержит информацию о глубине и структуре тканей. [3, 4] Интерференционная картина регистрируется детектором, который преобразует оптические сигналы в электрические [5].

БСОЛЗ позволила создать двумерное изображение ткани пальца. МУРС помогло уменьшить искажения результатов. Были получены структурные изображения отпечатка пальца человека in vivo с максимальной глубиной зондирования на длине волны близкой к 1,3 мкм [6].



а *б* *в*

Рис. 1. Структурные изображения отпечатки пальца человека in vivo, полученные при использовании метода малоуглового растрового сканирования и улучшенной быстро сканирующей оптической линии задержки на следующих длинах волн: 1482 нм (*а*), 1298 нм (*б*) и 840 нм (*в*)

МУРС ОКТ отпечатка пальца человека позволяет исследовать не только верхний слой кожи, но и более глубокие слои, что может быть полезно для изучения изменений, связанных с биологическим возрастом [7], дерматологическими заболеваниями или воздействием внешней среды.

Системы, использующие метод МУРС отпечатка пальца, могут стать основой для биометрических систем, которые будут использоваться в системах безопасности и доступа. Сравнение отпечатков пальцев на различных длинах волн может увеличить точность идентификации [4].

Список литературы

1. Chereshnev V.O., Romanenko I.M., Kuleshov I.V. // Modern high-tech technologies. 2019. V. 10. P. 319-323.

2. Chereshnev V.O., Abdulkareem S.N. // Modern high-tech technologies. 2019. V. 12(1). P. 118-122.

3. Ghaleb K.E.S. // Basic research. 2014. V. 4(3). P. 479-483.

4. Frolov S.V., Potlov A.Yu., Petrov D.A. // Quantum Electronics. 2017. V. 4. P. 347-354.

5. Potlov A.Yu., Ghaleb K.E.S., Abdulkareem S.N. // News of the Southern Federal University. Technical sciences. 2012. P. 129-134.

6. Abdulkareem S.N., Petrov D.A. //News of TulSU. Technical sciences. 2018. V. 3. P. 216-224.

7. Korobov A.A., Secheneva E.V., Morgunov N.V. // E.R.A – Modern science: electronics, robotics, automation. 2024. V. 1. P. 84-85.

УДК 535(06)+004(06)

Е.К. ФЕДОРОВ, И.Н. ПАВЛОВ, О.В. КОРОЛЬКОВА
Национальный исследовательский университет «МЭИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ НАРУШЕННОГО ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ

Описана экспериментальная установка, позволяющая исследовать неоднородную жидкость методом нарушенного полного внутреннего отражения. Неоднородность создается с помощью нагревания воды в жестяной ёмкости, которая в свою очередь контактирует с жидкостью в кювете. Получены распределение показателя преломления и распределение температуры жидкости в кювете в зависимости от вертикальной координаты.

E.K. FEDOROV, I.N. PAVLOV, O.V. KOROLKOVA
National Research University MPEI (Moscow Power Engineering Institute)

INVESTIGATION OF STRATIFIED FLUID BY THE METHOD OF FRUSTRATED TOTAL INTERNAL REFLECTION

An experimental setup is described that makes it possible to study an inhomogeneous liquid by the method of frustrated total internal reflection. The inhomogeneity is created by heating water in a tin container, which in turn comes into contact with the liquid in the cuvette. The distribution of the refractive index and the temperature distribution of the liquid in the cuvette depending on the vertical coordinate are obtained.

Метод нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) широко используется в нефтегазовой сфере. Он позволяет оценивать качество природных углеводородов [1]. Также метод НПВО является одним из способов изучения физических процессов, происходящих в прозрачных каплях [2], Для определения показателя преломления жидкости метод НПВО используется также в интерферометрических системах [3]. Актуальным применением метода НПВО является разработка датчиков дождя и тумана на его основе.

Целью работы является экспериментальное получение распределения показателя преломления стратифицированной жидкости в кювете в зависимости от вертикальной координаты методом НПВО для сравнения с моделью, используемой в методе лазерной рефрактографии [4]. На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки. В ней используется полупроводниковый лазерный модуль с длиной волны излучения 658 нм и

мощностью 30 мВт, телескопическая система формирования широкого коллимированного пучка, состоящая из двух собирающих линз с разными фокусными расстояниями и точечной диафрагмы в фокусе между ними, поляризатор для выделения компоненты, параллельной плоскости падения, экран для наблюдения изображения отражённого пучка, видеокамера для регистрации этого изображения и компьютер для хранения и обработки полученных изображений, а также емкость для создания температурной неоднородности и нагреватель. Для создания стратифицированной жидкости в кювете использовалась жестяная ёмкость с нагретой водой. Дно ёмкости приводилось в контакт с верхним слоем жидкости в кювете. Так как дно ёмкости ровное и горизонтальное, то считается, что показатель преломления жидкости в кювете зависит только от вертикальной координаты. Результаты обработки полученных изображений показаны на рис. 2. В верхней части слоя полученные распределения полностью совпадают, отклонение распределения показателя преломления от выбранной модели в нижней части слоя может быть связано с качеством используемого широкого коллимированного пучка, качеством цифровой камеры и фоновой засветкой.

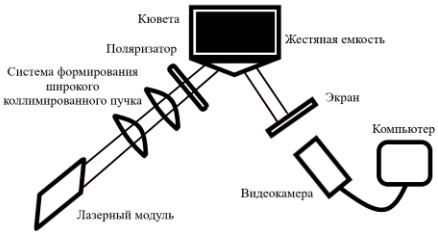


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

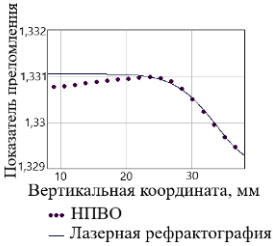


Рис. 2. Распределение температуры от вертикальной координаты после закипания воды в ёмкости

Работа выполнена в рамках проекта «Оптические датчики дождя и тумана» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2024-2026 гг.

Список литературы

1. Рахимов Н.Р., Тынчеров К.Т., Селиванова М.В., Альмухаметов Э.М. // Датчики и системы. 2018. № 7 (227). С. 27-33.

2. Павлов И.Н., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В. // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 2. С. 130.

3. Zhou Y., et al. // Scientific Reports. 2018. V. 8. No. 1. P. 15231.

4. Евтихиева О.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С. // М.: ФИЗМАТЛИТ. 2008.

УДК 535(06)+004(06)

И.П. МАТВЕЕВ[1], С.П. КОТОВА[1,2], Д.В. ПРОКОПОВА[2],
Н.Н. ЛОСЕВСКИЙ[2]
[1]*Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева*
[2]*Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЖЁСТКОСТИ ОПТИЧЕСКОГО ПИНЦЕТА ПРИ ЗАХВАТЕ РАЗЛИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ

Представлены экспериментальные результаты по определению жёсткости оптической ловушки, полученные методами отрывных сил и равновесного распределения при захвате различных микрообъектов.

I.P. MATVEEV[1], S.P. KOTOVA[1,2], D.V. PROKOPOVA[2],
N.N. LOSEVSKY[2]
[1]*Samara National Research University*
[2]*Samara branch of Lebedev Physical Institute of the RAS*

DETERMINATION OF THE STIFFNESS OF THE OPTICAL TWEEZERS WHEN CAPTURING VARIOUS OBJECTS

Experimental results on determining the stiffness of an optical trap obtained by methods of drag forces and equipartition distribution when capturing various micro-objects are presented.

Метод оптического пинцета основан на захвате и удержании различных микро- и нанообъектов с помощью острофокусированного лазерного пучка. Возможность управлять захваченными частицами позволяет применять оптический пинцет для изучения свойств микрообъектов, взвешенных в жидкости, без учёта взаимодействия с дном и стенками кюветы, сортировать и упорядочивать их [1]. В связи с распространением лазерных пинцетов и возникновением проблемы единообразного описания их характеристик важную роль играет определение жёсткости оптической ловушки.

Все методы калибровки можно разделить на две группы: пассивные и активные. Пассивная калибровка – калибровка, при которой траектория захваченной частицы измеряется в пределах фиксированной оптической ловушки. Основная физическая причина этого перемещения – броуновское движение частиц. Активная калибровка – калибровка, при которой измеряется воздействие известной силы на оптически захваченную частицу путём приложения потока жидкости.

В данной работе обобщены результаты лаборатории когерентной оптики по определению характеристик оптического пинцета, а именно их жёсткости, различными методами [2, 3], при захвате различных микрообъектов (латексные частицы, дрожжи, эритроциты). Экспериментально реализованы простые способы определения жесткости ловушек методами отрывных сил (рис. 1) и равновесного распределения (рис. 2) при захвате латексных частиц диаметром 2 мкм. Было определено, что жёсткость в методе отрывных сил равна $k = 0.68 \pm 0.08$ пН/мкм, а в методе равновесного распределения $k = 0.72 \pm 0.06$ пН/мкм. Значения жёсткости, полученные различными методами, согласуются друг с другом с учётом ошибки. Проведены также эксперименты по определению жёсткости однопучковой ловушки при захвате клеток дрожжей и эритроцитов.

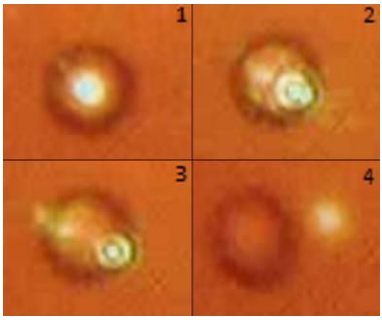


Рис. 1. Зарегистрированный отрыв частицы в методе отрывных сил

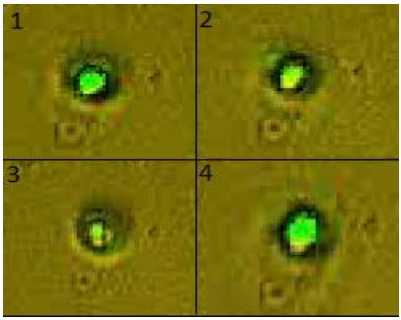


Рис. 2. Колебания частицы около положения равновесия в методе равновесного распределения

Список литературы

1. Ashkin A., Dziedzic J.M., Bjorkholm J.E. and Chu S. // Optics Letters. 1986. V. 11. P. 288.

2. Jones P., Maragó O., Volpe G. // Optical Tweezers. Cambridge: Cambridge University Press. 2015.

3. Gieseler J, Gomez-Solano J.R., Magazzù A, et al. // Advances in Optics and Photonics. 2021. V. 13. P. 74.

УДК 535(06)+004(06)

А.А. ЖИХОРЕВА, М.В. БЕЛАШОВ[1], А.В. БЕЛАШОВ,
И.В. СЕМЕНОВА, О.С. ВАСЮТИНСКИЙ
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
[1]Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФАЗОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФАЗОВО-КОНТРАСТНОЙ МИКРОСКОПИИ SLIM ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЧИСЛОВЫХ АПЕРТУРАХ ОСВЕЩЕНИЯ ОБРАЗЦА

Работа посвящена анализу и оптимизации метода количественной фазовой микроскопии SLIM для исследования микроскопических фазовых объектов, в том числе живых и фиксированных цитологических образцов. Благодаря реализации внешнего фазового контраста в инвертированном флуоресцентном микроскопе с использованием пространственно-временного модулятора света была реализована возможность регистрации набора из четырёх фазово-контрастных изображений, соответствующих различным значениям фазового запаздывания нерассеянного излучения (опорной волны). В работе изучается влияние различных параметров освещения образца с использованием кольцевой апертуры конденсора на качество восстановления фазовых изображений тестовых цитологических образцов.

A.A. ZHIKHOREVA, M.V. BELASHOV[1], A.V. BELASHOV,
I.V. SEMENOVA, O.S. VASYUTINSKII
Ioffe Institute, Saint-Petersburg
[1]ITMO University, Saint-Petersburg

ANALYSIS OF PHASE IMAGES RECONSTRUCTION QUALITY USING SPATIAL LIGHT INTERFERENCE MICROSCOPY AT VARIOUS NUMERICAL APPERTURES OF SAMPLE ILLUMINATION

We report analysis and optimization of SLIM quantitative phase microscopy aimed at non-invasive monitoring of various microscopic phase objects, including living and fixed cytological samples. Implementation of external phase contrast in inverted fluorescence microscope using a spatial light modulator provides opportunity for registration of a set of four phase-contrast images corresponding to different values of the unscattered reference wave phase delay. The effect of various sample's illumination patterns on the reconstructed phase image quality is analyzed and reported.

Методы количественной фазовой микроскопии активно используются для анализа различных фазовых и амплитудно-фазовых объектов, а также исследования ряда процессов, происходящих с живыми клетками в процессе их гибели, деления или реакции на внешние раздражители. Использование низкокогерентных методов голографической микроскопии позволяет, как правило, получать более качественные фазовые изображения объектов, обладающие лучшим пространственным разрешением и точностью восстановления фазы прошедшей волны. Один из таких методов SLIM (spatial light interference microscopy) основан на регистрации нескольких фазово-контрастных изображений объекта с изменяемым с помощью пространственно-временного модулятора света LCOS-SLM фазовым запаздыванием опорной (нерассеянной) волны, а также последующей обработке изображений для получения распределений фазового сдвига, внесенного объектом. При этом, как и в случае обычной фазово-контрастной микроскопии, производится структурированное освещение образца в виде конуса света, вырезаемого кольцевой диафрагмой конденсора.

Нами было проведено исследование качества восстановления фазовых распределений цитологического образца при разных диаметрах кольцевой диафрагмы, изменяемого в диапазоне 2 - 13 мм, что соответствовало варьированию числовой апертуры освещения образца вплоть до 0.52. Для этого на 3D-принтере нами было изготовлено несколько кольцевых диафрагм с различными параметрами диаметра и ширины кольцевой диафрагмы. После этого соответствующие паттерны фазового запаздывания формировались на пространственно-временной модуляторе света, что позволяло регистрировать фазово-контрастные изображения при разных параметрах освещения образца и восстанавливать фазовые изображения клеток. Было показано, что варьирование диаметра кольцевой апертуры изменяло степень пространственной когерентности освещающего излучения и в некоторых случаях приводило к ухудшению качества фазовых изображений.

Набор восстановленных фазовых изображений сопоставлялся с эталонным фазовым изображением, синтезированным из трёхмерного распределения показателя преломления, которое было получено с помощью голографической томографии. Анализ показал, что наилучшее качество восстановления фазы образца достигалось при его освещении в диапазоне числовых апертур $NA_{ring} = [0.26; 0.29]$. Полученные результаты могут быть использованы для повышения точности мониторинга цитологических образцов методов SLIM.

УДК 535(06)+004(06)

М.Д. БАБИН, Б.В. СОКОЛЕНКО, Н.В. ЛЯХОВИЧ (ШОСТКА), Ю.А. ЕГОРОВ
Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь

ФАЗОВАЯ ПРОФИЛОМЕТРИЯ ОПТИЧЕСКИ ГЛАДКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ СИНГУЛЯРНЫХ ПУЧКОВ

Приведены результаты численного моделирования рассеяния когерентных световых пучков с сингулярностью волнового фронта на поверхности с неоднородным рельефом. Используя скалярную теорию дифракции, получены условия восстановления оптического вихря в дальней зоне за фазовым экраном с шероховатостью, соответствующей R_a 0,08 мкм и менее.

M.D. BABIN, B.V. SOKOLENKO, N.V. LYAKHOVICH (SHOSTKA), Yu.A. EGOROV
V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

PHASE PROFILOMETRY OF OPTICALLY SMOOTH SURFACES BASED ON SINGULAR BEAMS

The results of numerical modeling of scattering of coherent light beams with wavefront singularity on a surface with inhomogeneous relief are presented. Using the scalar diffraction theory, the conditions for the recovery of the optical vortex behind a phase screen with roughness corresponding to R_a 0.08 μm and less are obtained.

Использование оптических вихрей для решения определённых метрологических задач известно уже два десятилетия. Первые работы в этой области показали многообещающие результаты при исследовании геометрии поверхностей [1, 2] с использованием фазовых сингулярностей в спекл-полях, вызванных поверхностными неоднородностями. Другим преимуществом сингулярных пучков является их применение в сочетании с интерферометрическими методами, которые обеспечивают высокую точность измерений как пропускающих, так и отражающих образцов различных форм и размеров бесконтактным способом [3].

Целью работы является установление динамики восстановления сингулярного волнового фронта после дифракции на отражающей оптически гладкой поверхности с квазипериодическим рельефом в виде борозд, имитирующих шероховатость, начиная с R_a 0,08 мкм и менее. В результате было установлено, что в пределах области фокусировки (5 мм) прослеживаются характерные искажения распределения интенсивности,

вследствие чего в поле пучка формируются локальные максимумы и минимумы. Заметно, что половина сечения пучка, соответствующая полю, прошедшему ступень, существенно слабее по интенсивности, что обусловлено деструктивной интерференцией частей пучка, имеющих разность фаз, кратную π. При прохождении середины пучка и далее, исходный вихрь смещается вслед за неоднородностью, а в окрестности оси пучка формируются вторичные сингулярности с разноимённо заряженными вихрями (топологические диполи). Миграция диполей в поле пучка, следуя за ступенью, приводит их к последующему пространственному сближению и аннигиляции, в результате чего осевой вихрь восстанавливает своё исходное положение и фазовую структуру в окрестности оси. Анализируя амплитуду и фазу интерференционными методами (рис. 1), можно извлечь информацию о фазовом набеге, вызванном присутствием рельефной поверхности (рис. 2).

Работа выполнена в рамках проекта, поддержанного РНФ, № 24-12-20013.

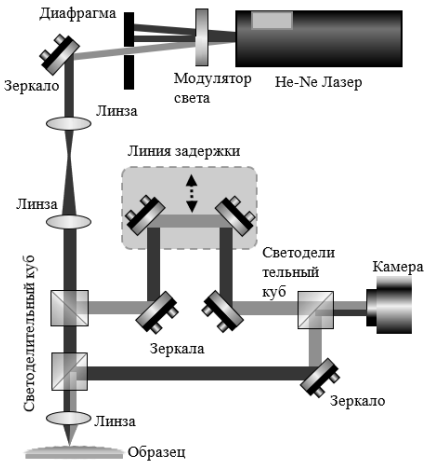


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (имитируемой численно)

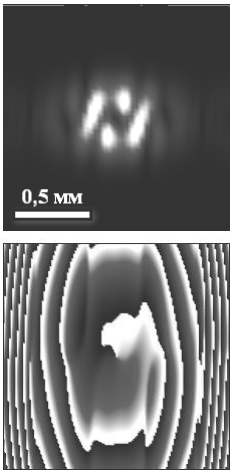


Рис. 2. Амплитуда и фаза дифрагированного пучка

Список литературы

1. Trusiak M., Cywińska M., et al. // Sci. Rep. Nature Pub. Group. 2020. V. 10 (1). P. 1-16.
2. Wang W., Yokozeki T., et al. // Opt. Express. 2006. V. 14 (22). P. 10195.
3. Islas-Islas J.M., Flores V., et al. // Optics & Laser Technology. 2020. V. 123 (4). P. 105915.

УДК 535(06)+004(06)

Т.К. КОРОЛЬ, Е.В. МАЛЮТИНА, Д.Д. РЕШЕТНИКОВ,
В.М. ПЕТРОВ
Санкт-Петербургский государственный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ИСКАЖЕНИЯ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ФАЗОВЫХ ШУМОВ В КОЛЬЦЕВОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ МОДУЛЯТОРОМ СВЕТА

Предложена модифицированная схема поляризационного кольцевого интерферометра с пространственным модулятором света для исследования поведения световых пучков под действием случайных двумерных фазовых искажений. Исследованы искажения волнового фронта в зависимости от характера фазовых экранов, а также режима распространения пучка в интерферометре.

T.K. KOROL, E.V. MALYUTINA, D.D. RESHETNIKOV,
V.M. PETROV
Saint-Petersburg State University

INVESTIGATION OF WAVE FRONT DISTORTIONS UNDER THE INFLUENCE OF PHASE NOISE IN A RING INTERFEROMETER WITH A SPATIAL LIGHT MODULATOR

Scheme of modified polarization ring interferometer with SLM for studying the behavior of light beams under the influence of random phase distortions is proposed. Distortion of wave front after passing different phase masks and in different propagation modes is studied.

Моделирование атмосферных турбулентностей, вызванных случайными флуктуациями показателя преломления среды n, является важной задачей в области коммуникаций по оптическому атмосферному каналу. Одним из методов экспериментального моделирования турбулентности является метод фазовых экранов с использованием пространственных модуляторов света (SLM). Так, используются либо схемы с несколькими модуляторами [1], либо схемы, в которых луч несколько раз отражается от одного модулятора [2]. В нашей работе обсуждается вариация второго метода.

Целью работы является исследование предложенной схемы моделирования оптической турбулентности, а также количественное

описание влияния различных двумерных фазовых шумовых распределений и настроек поляризационного интерферометра на характер амплитудного и фазового распределения волнового фронта оптического пучка. В данной работе представлена оптическая схема (рис. 1) с кольцевым поляризационным интерферометром, в котором исследуемая лазерная мода несколько раз преобразуется на одном SLM с двумерным шумовым распределением, что эквивалентно прохождению нескольких одинаковых фазовых экранов. Результат интерференции мод на выходе интерферометра наблюдается при помощи CCD-камеры.

Поляризатор P на входе схемы устанавливает плоскость поляризации таким образом, чтобы весь пучок оказался в резонаторе. Полуволновая пластинка HWP позволяет изменять режим распространения пучка в интерферометре. Наиболее интересным является случай, когда пластинка поворачивает плоскость поляризации луча на 45 °, при этом лазерный пучок будет совершать множество обходов интерферометра, каждый раз теряя половину интенсивности на поляризационном светоделителе PBS.

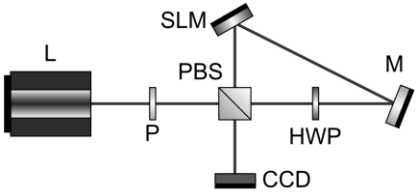


Рис. 1. Схема установки: L – полупроводниковый лазер 650 нм, P – поляризатор, PBS – поляризационный светоделитель, SLM – пространственный модулятор света, HWP – полуволновая пластинка, M – зеркало, CCD – камера с ПЗС-матрицей

Таким образом, в работе исследован характер турбулентных искажений в предложенной схеме кольцевого интерферометра, получена зависимость степени искажения оптического пучка от параметров двумерных фазовых шумов и режимов обхода интерферометра, что позволит нам в будущем усовершенствовать методы исследования [3, 4] влияния оптической турбулентности на пучки с различной амплитудной и фазовой структурой.

Т.К. Король благодарит Михаила Романовского за финансовую поддержку его работы.

Список литературы

1. Wang F., Toselli I, et al. // Applied Optics. 2016. V. 55. P. 1112.
2. Kumar P., Rao A.S., et al. // Sci. Rep. 2023. V. 13. P. 315.
3. Reshetnikov D.D., Korol T.K., et al. // Opt. and Spec. 2024. V. 7. P. 763.
4. Reshetnikov D.D., Korol T.K., et al. // ICLO. 2024. P. 170

УДК 535(06)+004(06)

Д.В. МАКСИМОВ, С.И. ЯКУБОВ, С.Н. ЛАПАЕВА,
С.И. ХАЛИЛОВ, А.О. ТИТОВА, М.В. БРЕЦЬКО
Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь

ВНЕОСЕВАЯ СУПЕРПОЗИЦИЯ ВЕКТОРНЫХ ПУЧКОВ СВЕТА

В данной работе исследуется преобразование поляризационной структуры векторных пучков при их пошаговом интерферометрическом сложении, с использованием Q-пластинки – устройства, формирующего световой луч с заданной поляризацией. Полученные экспериментальные данные по распределению поляризации соответствуют теоретическим расчётам.

D.V. MAKSIMOV, S.I. YAKUBOV, S.N. LAPAEVA,
S.I. KHALILOV, A.O. TITOVA, M.V. BRETSKO
V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

OFF-AXIS SUPERPOSITION OF VECTOR LIGHT BEAMS

This paper studies the transformation of the polarization structure of vector beams during their step-by-step interferometric addition, using a Q-plate, a device that forms a light beam with a given polarization. The obtained experimental data on polarization distribution correspond to theoretical calculations.

Векторные пучки представляют собой решение векторных волновых уравнений с пространственно-изменяющейся поляризацией [1], как правило, фаза и поляризация в их центрах – не определена. Такие пучки имеют потенциальное применение в спектроскопии, измерении двулучепреломления, также векторные пучки широко используются в метрологии для измерений с высоким разрешением, например, визуализации с высоким разрешением, а также точных измерений расстояния и скорости [2].

Цель работы заключается в исследовании преобразования поляризационной структуры векторных пучков при пошаговом интерферометрическом сложении. Для этого нами была собрана экспериментальная установка, представленная на рис. 1.

Луч, выходящий из лазера, попадает в коллиматор, необходимый для формирования пучка подходящего диаметра и его фильтрации, затем, системой из поляризатора и λ/2 пластины, лазерному пучку задается линейная поляризация. Так, луч с заданной линейной поляризацией

попадает на Q-пластину, для генерации векторного пучка. После преобразования на Q-пластине, векторный пучок попадает в интерферометр Маха–Цендера, с чётным количеством переотражений, где на выходе анализируется λ/4 пластиной и поляризатором, образующие Стокс-поляриметр, для расчёта параметров Стокса. Стоит отметить, что зеркало M2 позволяет пошагово сдвигать пучки с точностью в 0.001 мм, благодаря двухосевой подвижке THORLABS XYT1.

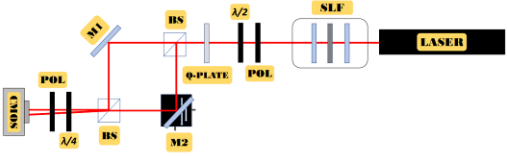


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: LASER – He-Ne лазер, SLF – коллиматор лазерного луча, POL – поляризатор, M1, M2 – зеркала, BS – делительный кубик, Q-plate – Q-пластинка,CMOS – КМОП-камера

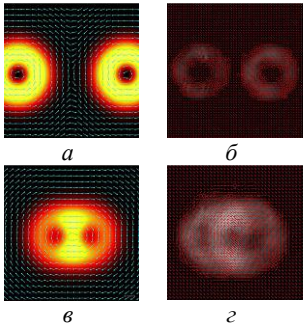


Рис. 2. Распределение поляризации моды TE_{01}; теоретическое моделирование (*а*, *в*), эксперимент (*б*, *г*)

Как итог (рис. 2), несоосная суперпозиция двух векторных пучков, в интерферометре Маха–Цендера, порождает ещё одну поляризационную сингулярность в области взаимодействия векторных пучков. Однако, перекрестная часть векторных пучков, имеет иное поляризационное распределение, в отличие от векторных пучков по отдельности. Данное экспериментальное исследование может быть полезно для создания протоколов безопасности на основе поляризационно-шифруемых данных.

Список литературы

1. Zhan Q. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications // Adv. Opt. Photon. 2009. V. 1. P. 1-57.

2. Soifer V.A., Korotkova O., Khonina S.N. Shchepakina E.A. Vortex beams in turbulent media: review // Computer Optics. 2016. V. 40 (5).

3. Vaity P., Aadhi A., Singh R.P. Formation of optical vortices through superposition of two Gaussian beams // App. Opt. 2013. V. 52. P. 6652-6656.

4. Vyas S., Kozawa Y., Sato S. Polarization singularities in superposition of vector beams // Opt. Express. 2013 V. 21. P. 8972-8986.

УДК 535(06)+004(06)

Е.В. МАЛЮТИНА, Т.К. КОРОЛЬ, Д.Д. РЕШЕТНИКОВ,
В.М. ПЕТРОВ
Санкт-Петербургский государственный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДВУМЕРНЫХ ФАЗОВЫХ ШУМОВ НА УСЛОВИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ

В работе исследуются зависимости нормированного индекса мерцания от структурного параметра показателя преломления для оптических вихрей, которые подвергались воздействию фазовых шумов. На пространственном фазовом модуляторе создавалась аддитивная смесь оптического вихря и пространственного двумерного фазового шума, описываемого моделями Колмогорова и Татарского. В работе представлены результаты исследования влияния фазового шума на искажение интерференционной картины оптических вихрей и опорных пучков.

E.V. MALYUTINA, T.K. KOROL, D.D. RESHETNIKOV,
V.M. PETROV
Saint-Petersburg State University

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF TWO-DIMENSIONAL PHASE NOISE ON THE PROPAGATION CONDITIONS OF OPTICAL VORTICES

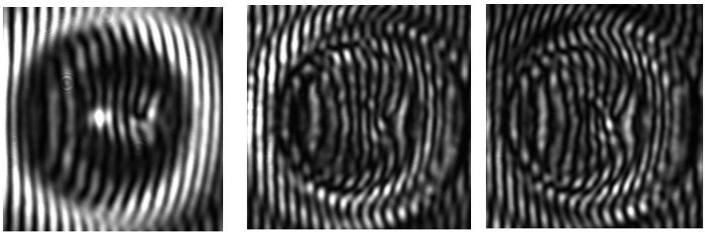
In this paper we studied the dependences of the normalized scintillation index on the structural parameter of the refractive index for optical vortices that were exposed to phase noise. An additive mixture of an optical vortex and spatial two-dimensional phase noise described by the Kolmogorov and Tatarskii models was created on a spatial phase modulator. The paper presents the results of a study of the influence of phase noise on the distortion of the interference pattern of optical vortices and reference beams.

Оптические вихри с аксиально-симметричной структурой поляризации, благодаря инвариантности к неконтролируемому вращению плоскости поляризации, представляют интерес в связи с развитием оптических атмосферных каналов связи [1]. При этом встает вопрос об устойчивости оптических вихрей при распространении в свободном пространстве [2]. Очевидно, что большое влияние на процесс распространения пучка с орбитальным угловым моментом (ОУМ) по атмосферному каналу оказывают турбулентности среды. Турбулентность

среды характеризуется двумерным случайным распределением флуктуаций показателя преломления среды Δn. Флуктуации могут достигать нескольких процентов от значения показателя преломления n, что ведёт к существенным изменениям фазы электромагнитной волны.

Целью данной работы было численное описание влияния фазовых шумов на распространение оптических вихрей.

В работе использовалась интерференционная схема детектирования оптических вихрей, предложенная в [3, 4]. На пространственном фазовом модуляторе (SLM) была сформирована аддитивная смесь пучка с ОУМ и двумерного фазового шума. В качестве пучков с ОУМ были выбраны пучки Лагерра–Гаусса. Результатом являются экспериментальные зависимости нормированного индекса мерцания от структурного параметра показателя преломления C_n^2.



а *б* *в*

Рис. 1. Изображение интерференционной картины пучка Лагерра–Гаусса без пространственного шума (*а*); модель Татарского $C_n^2 = 10^{-6}$ мм$^{-2/3}$ (*б*), модель Колмогорова $C_n^2 = 10^{-6}$ мм$^{-2/3}$ (*в*)

На рис. 1 изображены картины интерференции пучков Лагерра–Гаусса с опорным пучком (плоской волной). Наличие так называемой «вилки» в интерференционной картине является признаком наличия ОУМ у пучка.

Таким образом, в работе был проведён анализ влияния фазовых шумов на распространение оптических вихрей. Сохранение особенностей интерференционной картины в виде «вилки» в будущем может позволить нам построить процедуру коррекции волнового фронта.

Список литературы

1. Акентьев А.С, Садовников М.А, Соколов А.Л., Симонов Г.В. // Оптика и спектроскопия. 2017. Т. 122 (6). С. 1044.

2. Wang J., Liu J., et al. // Nanophotonics, 2022, V. 11 (4). P. 645.

3. Решетников Д.Д, Король Т.К, Малютина Е.В., Петров В.М. // Оптика и спектроскопия. 2024. Т. 132. С. 763.

4. Reshetnikov D. D., Korol T.K., Malyutina E.V., Petrov V.M. // International Conference Laser Optics (ICLO) 2024. P. 170.

УДК 535(06)+004(06)

С.И. ЯКУБОВ, Д.В. МАКСИМОВ, С.Н. ЛАПАЕВА,
С.И. ХАЛИЛОВ, А.О. ТИТОВА, М.В. БРЕЦЬКО
Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ВЕКТОРНЫХ ВИХРЕВЫХ ПУЧКОВ СВЕТА С ПОМОЩЬЮ DMD

В предложенной работе представлен интерференционный метод по формированию векторных вихревых пучков Лагерра–Гаусса, с использованием микрозеркального пространственного модулятора света (DMD). Полученные экспериментальные данные по распределению поляризации соответствуют теоретическим расчётам, что подтверждает высокую точность и эффективность данного метода генерации векторных вихревых пучков.

S.I. YAKUBOV, D.V. MAKSIMOV, S.N. LAPAEVA,
S.I. KHALILOV, A.O. TITOVA, M.V. BRETSKO
V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

METHOD OF FORMING VECTOR VORTEX LIGHT BEAMS USING DMD

The proposed work presents an interference method for the formation of vector vortex beams of Laguerre–Gauss using a micromirror light modulator (DMD). The obtained experimental data on the polarization distribution correspond to theoretical calculations, which confirms the high accuracy and efficiency of this method for generating vector vortex beams.

Векторные структурированные пучки дают новые возможности для передачи информации, позволяя кодировать её не только через интенсивность и частоту, но и с помощью сложных пространственных и поляризационных конфигураций [1]. Для реализации таких систем связи, важно создание простого и быстрого способа генерации векторных структурированных пучков. Существуют методы, основанные на использовании оптического волокна, фазовых Q-пластин [1, 2], пространственного модулятора света (SLM) [3]. В данной работе предложен метод на основе микрозеркального пространственного модулятора света (DMD) типа DLP LightCrafter 6500.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Линейно поляризованный гауссов пучок от He-Ne лазера (Ls) после пространственного фильтра (SLF1) разделяется на два пучка делительной

призмой (Bs) и системой зеркал (M1, M2) направляются на DMD. Один из пучков проходит через λ/2-пластину, для поворота плоскости поляризации на 90°. Далее оба пучка пропускаются через λ/4-пластину, которая преобразует линейно поляризованные пучки в лево- и право- циркулярно-поляризованные пучки, которые сходятся на экране DMD. На экране выводится компьютерно-синтезированная голограмма поляризованных компонент структурированного пучка. Каждый падающий пучок, после отражения от голограммы, создает множество дифракционных порядков. Порядок дифракционной решётки голограммы подбирается таким образом, чтобы пучок с топологическим зарядом (ТЗ) l = 1 от первого пучка и ТЗ l = -1 от второго пучка распространялись вдоль одной оси от плоскости DMD. Далее с помощью пространственного фильтра (SLF2) из общего массива выделяются указанные дифракционные порядки. Поляризационная структура образованного векторного пучка анализируется с помощью Стокс-поляриметра [4]. Поляриметр состоит из λ/4-пластины и поляризационной камеры Kiralux CMOS CS505MUP, которая снимает сразу четыре поляризационные компоненты, после обработки которых, воспроизводится векторная структура поля на фоне распределения интенсивности. На рис. 2 приведена экспериментально полученные поляризационные структуры TE, TM и HE векторных мод.

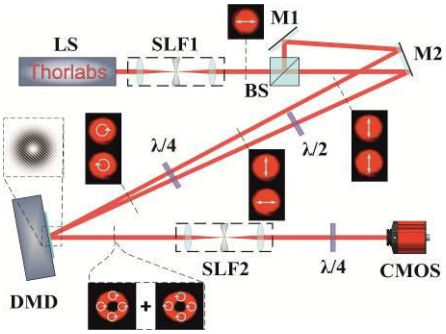


Рис. 1. Экспериментальная установка

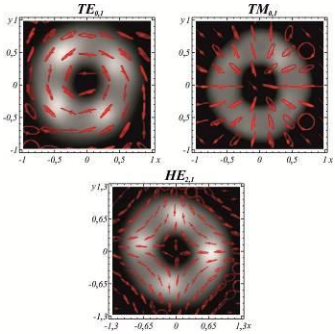


Рис. 2. Поляризационные структуры TE-, TM- и HE-мод

Список литературы

1. Wang J., Liang Y. // Frontiers in Physics. 2021. V. 9. P. 68-84.
2. Darryl N., Filippus S.R., et al. // Nature Photonics. 2015. V 10. P 327-332.
3. Khalilov S.I., Bretsko M.V., et al. // Information Optics. 2023. V. 32, P. 90-96.
4. Фадеева Т.А., Воляр А.В. // Патент № 65939 Украина. Опубл. 15.04.04. Бюл. № 4.

Д.И. КАШАПОВА[1,2], Д.В. ПРОКОПОВА[1], С.П. КОТОВА[1,2]
[1]*Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН*
[2]*Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева*

ФОРМИРОВАНИЕ СПИРАЛЬНЫХ ПУЧКОВ ГОЛОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ С УЧЁТОМ АППАРАТНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ

Представлены результаты экспериментов по формированию спиральных пучков света с помощью жидкокристаллического модулятора света голографическим методом с учётом аппаратных ограничений, накладываемых модулятором на структуру и пространственный спектр формируемых пучков.

D.I. KASHAPOVA[1,2], D.V. PROKOPOVA[1], S.P. KOTOVA[1,2]
[1]*Samara branch of Lebedev Physical Institute of the RAS*
[2]*Samara National Research University*

FORMATION OF SPIRAL BEAMS BY HOLOGRAPHIC METHOD TAKING INTO ACCOUNT HARDWARE LIMITATIONS

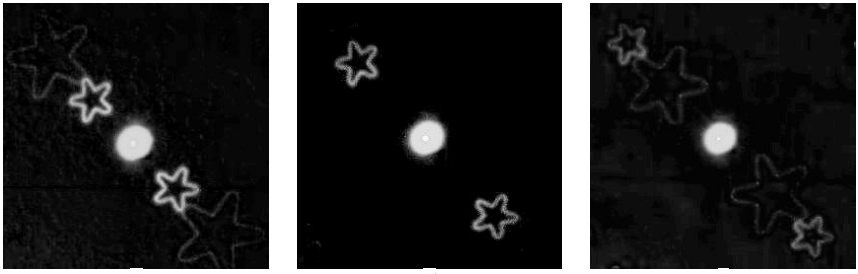
The results of experiments on the formation of spiral beams of light using a liquid crystal light modulator by the holographic method are presented, taking into account the hardware limitations imposed by the modulator on the structure and spatial spectrum of the formed beams.

Структурированные световые поля, включая спиральные пучки света, находят широкое применение в современной оптике и фотонике для решения разнообразных прикладных задач, таких как манипуляция микро- и наночастицами в системах оптического пинцета [1], микролитография [2] и анализ контурных изображений [3]. Целью данного исследования является определение влияния аппаратных ограничений жидкокристаллического пространственного модулятора света (ЖК ПМС) на формируемое голографическим методом световое поле.

Спиральные пучки света [4] (СПС) – световые поля, сохраняющие структуру распределения интенсивности с точностью до масштаба и вращения при распространении и фокусировке. СПС в форме замкнутой кривой определяются условием квантования: $S = \pi\rho^2 N/2$, где S – площадь под кривой, ρ – гауссов параметр, N – параметр квантования.

В работе используется ЖК ПМС Holoeye Heo-1080P (1920 x 1080 пикселей, размер пикселя 8 мкм), он накладывает ограничения на формируемое световое поле. Чтобы определить их, был исследован пространственный спектр поля с учётом параметров ПМС [5].

В ходе проведённого исследования было установлено, что при увеличении параметра квантования структура формируемого СПС приближается к структуре контура, по которому он был построен, при этом увеличивается ширина его пространственного спектра. Изменение угла записи голограммы позволяет разделить порядки дифракции в пространстве, но конечное разрешение ПМС ограничивает значение угла записи (рис. 1). Увеличение угла записи приводит к уменьшению пространственного спектра формируемого поля. При несоблюдении этих соотношений происходит снижение энергетической эффективности формирования СПС. Для эффективного формирования структурированных световых полей голографическим методом при помощи ПМС необходимо учитывать его разрешение и выбирать оптимальное соотношение структуры формируемого поля и желаемого угла дифракции.



а *б* *в*

Рис. 1. Экспериментально построенные спиральные пучки света при разных углах записи голограммы: 1.5 ° (*а*), 2.5 ° (*б*), 3.5 ° (*в*)

Список литературы

1. Майорова А.М. и др. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2022. Т. 49. С. 9-14.
2. Armon N., Greenberg E., et al. // Chemical communications. 2019. V. 55. P. 12773-12776.
3. Прокопова Д.В., Котова С.П. // Фотоника. 2020. Т. 14. С. 170-183.
4. Абрамочкин Е.Г., Волостников В.Г. // Физматлит, Москва. 2010.
5. Васильев С.Н., Шевалдин В.Т. // Урал. федер. ун-т. Екатеринбург. С. 80.

И.В. ГАЛАКТИОНОВ[1,2], В.В. ТОПОРОВСКИЙ[1,2]
[1]*Московский технический университет связи и информатики*
[2]*Институт динамики геосфер им. М.А. Садовского РАН, Москва*

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ КОНЦЕНТРАЦИИ ЧАСТИЦ В ОПТИЧЕСКИ РАССЕИВАЮЩЕЙ СРЕДЕ

Представлена экспериментальная реализация методики измерения концентрации оптически рассеивающей среды с использованием закона Бугера–Ламберта–Бэра.

I.V. GALAKTIONOV[1,2], V.V. TOPOROVSKY[1,2]
[1]*Moscow Technical University of Communications and Informatics*
[2]*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of the RAS, Moscow*

ALGORITHM OF EXPERIMENTAL ESTIMATIONS OF THE CONCENTRATION OF PARTICLES INSIDE THE OPTICALLY SCATTERING MEDIUM

An experimental implementation of a technique for measuring the concentration of an optically scattering medium using the Bouguer–Lambert–Beer law is presented.

Наиболее оптимальным для экспериментального измерения концентрации взвешенных частиц в рассеивающей среде [1, 2] представляется оптический метод. В работе мы использовали закон Бугера–Ламберта–Бэра [3], согласно которому ослабление параллельного монохроматического пучка света при распространении его сквозь рассеивающую и поглощающую среду происходит экспоненциально [4]: $I_1 = I_0 exp(-\mu_e l)$, где I_1 – распределение интенсивности пучка после прохождения среды, I_0 – распределение интенсивности пучка до прохождения среды, μ_e – показатель экстинкции, мм$^{-1}$, l – толщина слоя среды, мм.

Для экспериментальной оценки концентрации рассеивающей среды была собрана и откалибрована [5] установка, включающая коллиматор, стеклянную кювету и ПЗС-камеру. Для сравнения уровней суммарных интенсивностей лазерного пучка, прошедшего трассу с кюветой с рассеивающей средой и без неё (с дистиллированной водой), была разработана утилита Image Comparer, графический интерфейс которой представлен на рис. 1.

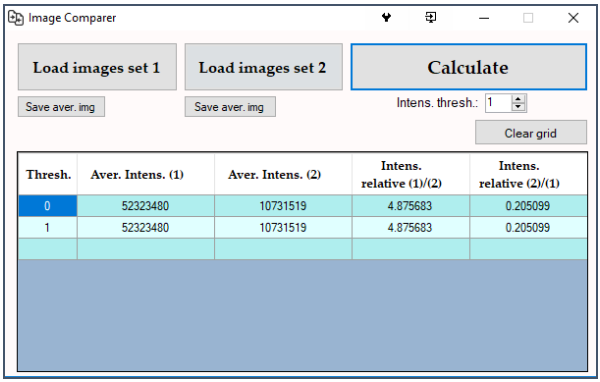


Рис. 1. Графический интерфейс утилиты Image Comparer
для сравнения средних интенсивностей двух наборов изображений

Утилита позволяла загружать два набора растровых изображений и устанавливать пороговое значение интенсивности. Таким образом, зная экспериментально измеренные значения интенсивности излучения до и после добавления в кювету суспензии полистироловых микросфер и зная толщину кюветы, из закона Бугера–Ламберта–Бэра мы можем вычислить показатель экстинкции $\mu_e = -ln(I/I_0)/l$. Однако, поскольку для используемой длины волны 0.65 мкм поглощением полистироловых микросфер можно пренебречь, как было показано ранее, показатель экстинкции μ_e становится равным показателю рассеяния μ_s. Далее, зная толщину рассеивающего слоя, диаметр рассеивателей, показатель рассеяния и длину волны излучения, в численной модели итерационным способом подбиралось значение концентрации рассеивателей и значение показателя рассеяния μ_s такое, чтобы соотношение интенсивностей до и после добавления рассеивателей в кювету совпадало с экспериментально полученным результатом. Такой подход может использоваться, в частности, для измерения концентрации раствора суспензии полистироловых микросфер в дистиллированной воде [6, 7].

Список литературы

1. Galaktionov I., Kudryashov A., Sheldakova J., et al. // Proc. SPIE. 2019. V. 10886. P. 1088619.
2. Kudryashov A., Rukosuev A., Samarkin V., et al. // Proc. SPIE. 2018. V. 10772. P. 107720V.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. 2005. С. 582-583.
4. Mosk A. // Nature Photonics. 2012. V. 6. P. 283.
5. Nikitin A., Galaktionov I., Sheldakova J., et al. // Proc. SPIE. 2019. V. 10925. P. 109250K.
6. Грин Х., Лейн В. // Москва, 1972. С. 500.
7. Galaktionov I., Nikitin A., Sheldakova J., et al. // Photonics. 2022. V. 9 (5). P. 296.

УДК 535(06)+004(06)

А.И. БУТЬ, А.М. ЛЯЛИКОВ
Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Беларусь

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ВОССТАНОВЛЕННОГО ВОЛНОВОГО ФРОНТА ТЕНЕВЫМИ МЕТОДАМИ

В работе рассматривается принципиально новый подход в снижении влияния неоднородностей подложки носителя голограммы, основанный на вычитании искажений подложки при наложении двух теневых картин, сформированных дифрагированными световыми волнами, восстановленными в комплексно-сопряжённых порядках дифракции при использовании одиночной голограммы и голограммы двукратного экспонирования.

A.I. BUT, A.M. LYALIKOV
Y. Kupala Grodno State University, Belarus

INCREASING THE ACCURACY OF MEASUREMENTS WHEN STUDYING THE RECOVERED WAVEFRONT USING SHADOW METHODS

The paper examines a fundamentally new approach to reducing the influence of inhomogeneities in the substrate of a hologram carrier, based on the subtraction of substrate distortions when superimposing two shadow patterns formed by diffracted light waves, reconstructed in complex conjugate diffraction orders when using a single hologram and a double exposure hologram.

Голографические интерференционные и теневые измерительные системы позволяют минимизировать аберрации оптической системы зондирования исследуемого фазового объекта, и как следствие, снижение систематической погрешности измерений на стадии формирования картин [1].

Если компенсация аберраций оптической системы диагностики фазового объекта, а также неоднородностей подложки носителя голограммы в голографической интерферометрии фазовых объектов реализуется практически для всех её методов (интерферометрии реального масштаба времени, двухэкспозиционной и дифференциальной интерферометрии, метода раздельных голограмм), то при теневых исследованиях волнового фронта восстановленного с голограммы,

исключение вышерассмотренных негативных влияний на результат измерений не всегда реализуемо [2, 3].

В работе рассматривается принципиально новый подход в снижении влияния неоднородностей подложки носителя голограммы, основанный на вычитании искажений подложки при наложении двух теневых картин, сформированных дифрагированными световыми волнами, восстановленными в комплексно-сопряжённых порядках дифракции.

Для получения теневых картин были использованы два ножа Фуко, фильтрующих комплексно-сопряжённые волны, восстановленные с одиночной объектной голограммы фазового объекта [4]. Показано, что используя два ножа Фуко, можно получать теневые картины с объектной голограммы с компенсацией неоднородностей её подложки.

Также продемонстрирована возможность и аналогичное исключение неоднородностей подложки общего носителя объектной и эталонной голограмм, а также аберраций системы регистрации в случае использования голограммы двукратного экспонирования. При получении теневых картин парой ножей Фуко перекрываются изображения щелевого источника, сформированные восстановленными волнами в порядке дифракции одного знака с объектной и эталонной голографических структур.

В работе отмечена возможность использования пары щелевых диафрагм в голографическом цветном теневом методе для минимизации погрешности измерений. Рассмотренный способ исключения влияния неоднородностей подложки носителя одиночной голограммы был опробован экспериментально. Приведены результаты экспериментальных исследований.

В заключении необходимо отметить, что применение способа минимизации влияния неоднородностей подложки носителя голограммы возможно только для голограмм с высококачественной записью информации.

Список литературы

1. Голографическая интерферометрия фазовых объектов /под ред. Г.И. Мишина. Л.: Наука, 1979.

2. Ляликов А.М. Высокочувствительная голографическая интерферометрия фазовых объектов. Гродно: ГрГУ, 2010.

3. Вест Ч. Голографическая интерферометрия. Москва: Мир, 1982.

4. Ляликов А.М., Буть А.И. // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. 2024. Т. 14. № 3. С. 32-37.

УДК 535(06)+004(06)

И.Н. ПАВЛОВ, И.Л. РАСКОВСКАЯ, С.А. ШИТОВ
Национальный исследовательский университет «МЭИ»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРАЕВОГО УГЛА СМАЧИВАНИЯ ЖИДКОСТИ ЛАЗЕРНЫМ РЕФРАКЦИОННЫМ МЕТОДОМ

В работе представлен рефракционный метод определения краевого угла смачивания капли жидкости на твёрдой прозрачной подложке. Выполнена компьютерная обработка полученных рефракционных изображений. При помощи полученных результатов смоделированы осесимметричные капли и представлена трассировка лучей, проходящих через них.

I.N. PAVLOV, I.L. RASKOVSKAYA, S.A. SHITOV
National Research University MPEI (Moscow Power Engineering Institute)

DETERMINATION OF THE CONTACT ANGLE OF LIQUID WETTING BY LASER REFRACTIVE METHOD

The paper presents a refractive method for determining the contact angle of wetting a liquid drop on a solid transparent substrate. Computer processing of the obtained refractive images was performed. Using the obtained results, axisymmetric droplets are modeled and the tracing of rays passing through them is presented.

Метод анализа смачивания, который основан на измерении краевого угла смачивания капель жидкости поверхности твёрдого тела используется для получения информации о структуре и свойствах поверхности раздела фаз. Краевым углом смачивания называется угол между твёрдой поверхностью и каплей жидкости в точке контакта трёх фаз: твёрдой, жидкой и газообразной. Величина угла смачивания показывает степень межмолекулярного взаимодействия частиц жидкости и поверхности твёрдого тела. На рис. 1 изображена схема прохождения оптического излучения через каплю. Излучение падает по нормали к стеклянной подложке и отклоняется при проходе через каплю воды. Прошедшие через крайние точки капли лучи формируют края рефракционного изображения капли, а их угол отклонения соответствует краевому углу смачивания капли в месте их прохождения. При известном расстоянии от твёрдой стеклянной подложки до экрана, положении краёв капли и радиусе рефракционного изображения капли, можно определить краевой угол смачивания капли [1, 2].

Для нахождения радиуса рефракционного изображения была написана программа на языке программирования Python. Использовалась попиксельная обработка изображений, полученных на экране.

На рис. 2 представлены результаты моделирования рефракционных лучей, проходящих через каплю жидкости. Для моделирования использовались различные математические функции формы кривых поверхности. Следствием трассировки лучей являлась визуализация отклонённых лучей на экране. По полученным рефракционным изображениям можно также определить параметры капель жидкости.

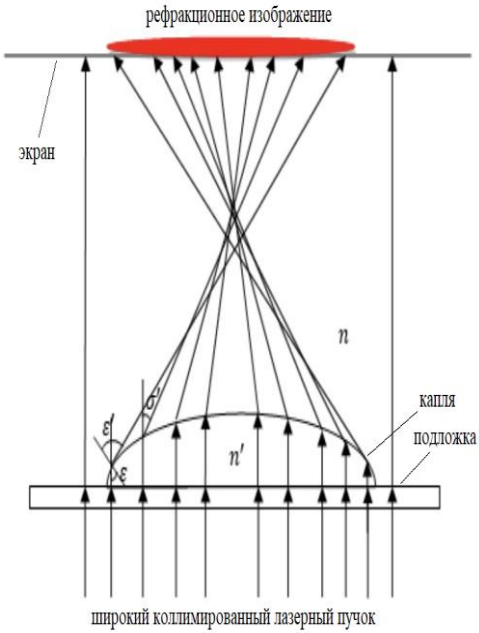


Рис. 1. Схема прохождения оптического излучения через каплю [1]

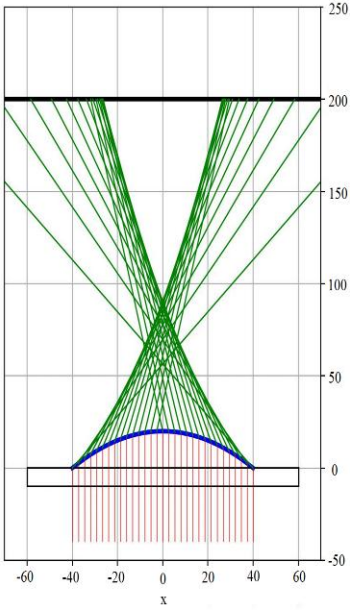


Рис. 2. Трассировка лучей через каплю со сферической поверхностью

Список литературы

1. Лукахин П.О., Павлов И.Н. и др. // Оптические методы исследования потоков // XV Международной научно-технической конференции: сбор. трудов. 2019. С. 174-179.

2. Павлов И.Н., Расковская И.Л. и др. // ЖЭТФ. 2017. № 4 (151). С. 670-681.

УДК 535(06)+004(06)

Д.Р. МАНУЧАРОВ, П.В. ПАВЛОВ
Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, Воронеж

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА СПЕКЛ-ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ АВИАЦИОННОГО ТОПЛИВА

Приведены результаты экспериментального исследования способа определения спор микроскопических грибов Hormoconis resinae в составе авиационного топлива с использованием метода спекл-структур оптического излучения. Определены основные параметры регистрируемых спекл-изображений, по которым возможно проводить расчёт количественной оценки степени биозагрязнения авиационных рабочих жидкостей.

D.R. MANUCHAROV, P.V. PAVLOV
Air Forces Academy named after Prof. N.E. Zhukovskiy and Yu.A. Gagarin, Voronezh

ASSESMENT OF THE POSSIBILITY OF USING THE METHOD SPECKLE DIAGNOSTICS TO DETERMINE BIOLOGICAL POLLUTION OF AVIATION FUEL

The results of an experimental study of the method for determining the spores of microscopic fungi Hormoconis resinae in the composition of aviation fuel using the speckle structure method of optical study are presented. The main parameters of the recorded speckle images have been determined, according to which it is possible to calculate the quantitative assessment of the degree of bio-contamination of aviation working fluids.

Одной из важных проблем влияющей на снижение безопасности полетов является биоповреждение авиационного топлива, так как, продукты жизнедеятельности микроорганизмов, засоряют фильтра топливной системы, что приводит к отключению двигателей [1]. Применение метода спекл-структур оптического излучения для исследования процессов метаболизма живых клеток и вирусов доказало его эффективность [2]. В рамках НИР «Резерв», проведены экспериментальные исследования по определению спор «керосинового гриба» Hormoconis resinae в составе авиационного топлива. Для этих целей разработана экспериментальная установка для реализации предлагаемого способа (рис. 1). Испытания комплекса проводились на пробах авиатоплива с различной концентрацией

микроорганизмов. В ходе эксперимента в течение заданного промежутка времени от каждой пробы авиатоплива *3* записывался при помощи видеокамеры *4* набор спекл-изображений в результате рассеянного когерентного излучения от лазера *1* на матовом рассеивателе *2*. Далее, с помощью специального программного обеспечения на ПЭВМ спекл-изображения подвергались корреляционной обработки в ходе которой рассчитывались значения коэффициентов корреляции секторов, на которых разбивались спекл-изображения от участка внутри кюветы. Для количественного определения концентрации микроорганизмов в составе пробы авиатоплива рассчитывалась плотность распределения и гистограмма коэффициентов корреляции от записанных спекл-изображений от каждой пробы.

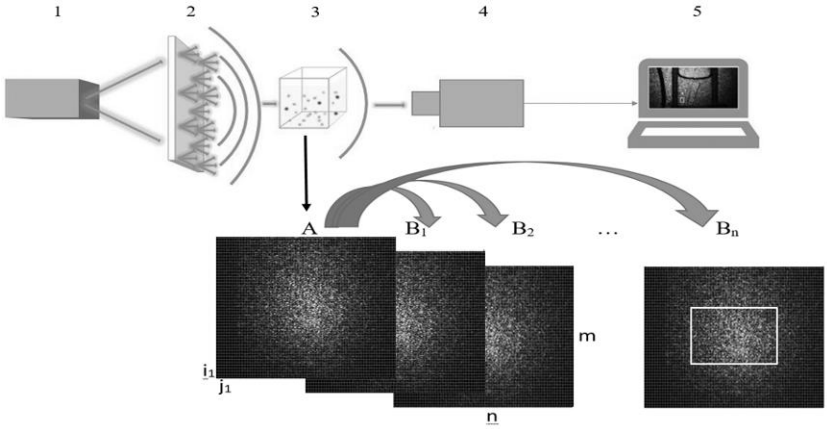


Рис. 1. Схема оптической установки для реализации способа определения биозагрязнения авиатоплива по анализу параметров спекл-изображений

Установлено, что по мере увеличения количества спор «керосинового гриба» Hormoconis resinae в составе пробы авиатоплива, значение коэффициента корреляции уменьшается, а по степени растяжения и смещения пика гистограммы распределения коэффициентов корреляции возможно проводить оценку концентрации и штамма микроорганизмов.

Список литературы

1. Кривушина А.А., Бобырева Т.В. и др. // Микология и фитопатология. 2020. Т. 54. № 2. С. 143-149.

2. Владимиров А.П., Малыгин А.С. // Медицинская техника. 2014. № 4. С. 8-11.

УДК 535(06)+004(06)

Д.А. ПОЛЕТАЕВ, Б.В. СОКОЛЕНКО, И.А. БУГАСОВ
Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИЯХ ПОДЛИННОСТИ КАРТИН

В работе приводится концепция применения спекл-интерферометрии для исследования подлинности художественных картин. Выдвигается гипотеза о возможности проведения подробного анализа полотен с различными техниками и датировками.

D.A. POLETAEV, B.V. SOKOLENKO, I.A. BUGASOV
V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

APPLICATION OF SPECKLE INTERFEROMETRY IN RESEARCHING THE AUTHENTICITY OF PAINTINGS

In this paper the concept of using speckle interferometry to study the authenticity of art paintings is presented. A hypothesis is put forward about the possibility of conducting a detailed analysis of canvases with different techniques and dates.

Произведения искусства весьма ценны. Это обуславливает рост количества способов их подделок. Вместе с тем современные методы проверки подлинности картин включают архивные работы по поиску данной работе в каталоге автора, а также экспертные искусствоведов. Однако количественные естественно-научные методы слишком немногочисленны. Представляется целесообразным предложить и проанализировать метод оценки подлинности картины с использованием точных измерений.

Картины, выполненные художниками, в отличии от напечатанных на принтере, имеют свои уникальные особенности – неровности, ввиду неравномерности распределения слоёв краски. Сканирование всей площади картины атомно-силовым микроскопом занимает чрезвычайно много времени. Оптическая микроскопия слишком субъективна для этого, так как решение о признании картины подлинной принимает эксперт. Спекл-интерферометрия – современный метод, который позволяет выполнить анализ объектов с линейными размерами много больше длины волны [1, 2]. Основная идея метода состоит в сложении волн от различных объектов, образующих сложную интерференционную картину.

Целью работы является анализ возможности применения спекл-интерферометрии в исследованиях особенностей художественных картин.

Предлагается концепция, в которой картина, подлинность которой уже установлена, облучается лазером. При этом каждая неровность создает особенный отклик и вносит вклад в общую интерференцию. Таким образом образуется спекл-интерферометрическая картина, которая считывается камерой и записывается компьютерной системой.

Художественная картина, подлинность которой требуется проверить, также облучается лазером. При этом её неровности создают отклики и вносят вклад в общую интерференционную картину. Таким образом образуется спекл-интерферометрическая картина, которая считывается камерой и записывается компьютерной системой. Из общих физических представлений следует, что разные типы техник (графика, масляная живопись, акварель и другие) будут иметь различные спеклы. Также требует отдельного рассмотрения поверхность, на которую наносится пигмент. Кроме того требуется отметить зависимость характеристик от способов подготовки поверхностей под картину (беление, шпаклевка), особенностей хранения и возраста материала (датировка картины). С точки зрения исследований это привносит дополнительные сложности. С другой стороны, данные характеристики также могут характеризовать подлинность картин.

Дальнейший анализ может сводиться к простой проверки корреляции различных спекл-картин для художественных картин. Также целесообразно рассмотреть возможности применения нейросетей для анализа и сравнения.

Список литературы

1. Bhaduri B., Quan C., et al. // Applied optics. 2010. V. 49 (18).

2. Максимова Л.А., Мысина Н.Ю. и др. // Известия Саратовского университета. 2011. Т.11 (2).

УДК 535(06)+004(06)

В.А. КОМОЦКИЙ, А.В. ПУСТОВАЛОВ[1], А.Р. РАВИН
Российский университет дружбы народов, Москва
[1]МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

МАКЕТ СЕЙСМОМЕТРА С ДАТЧИКОМ КОЛЕБАНИЙ НА ОСНОВЕ ГЛУБОКОЙ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЁТКИ

Создан и исследован лабораторный макет горизонтального сейсмометра, в котором применён новый датчик угловых колебаний инерционного маятника с применением лазерного зондирования глубокой отражательной дифракционной решётки. Выходной сигнал датчика пропорционален угловому отклонению маятника от положения равновесия.

V.A. KOMOTSKII, A.V. PUSTOVALOV[1], A.R. RAVIN
Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow
[1]MIREA – Russian Technology University, Moscow

MODEL OF SEISMOMETER WITH VIBRATION SENSOR BASED ON A DEEP REFLECTING DIFFRACTION GRATING

A laboratory model of a horizontal seismometer was created and studied, in which a new angular oscillations sensor based on laser probing of a deep reflective grating was used. The output signal of the sensor is proportional to the angular deviation of the pendulum from the equilibrium position.

В статье [1] был описан макет горизонтального сейсмометра, в котором в качестве датчика колебаний инерционного маятника сейсмометра применялся датчик дифракционного типа, который включал в себя полупроводниковый лазер, блок из двух фазовых дифракционных решёток (ДР) с одинаковыми периодами, расположенных параллельно, фотодиод в одном из первых порядков дифракции после блока решёток. Инерционный маятник сейсмометра был выполнен в виде диска, который закреплён на вертикальной оси в подшипниках, связан с возвратной пружиной и снабжён магнитным демпфером. Период собственных колебаний диска составлял от 1 до 2 с. На краю диска был расположен дополнительный грузик массой 100 г. При движении земной поверхности в направлении, перпендикулярном радиусу, проведённому из центра вращения диска в точку расположения грузика, происходит поворот диска на угол, пропорциональный силе инерции.

Существенное отличие оптического дифракционного датчика от индукционного состоит в том, что сигнал с его выхода пропорционален смещению маятника от положения равновесия, а не скорости его движения, как это имеет место в сейсмометрах с индукционными датчиками колебаний.

В макете сейсмометра, который исследован в данной работе, применён новый тип датчика колебаний на основе глубокой отражательной рельефной ДР, с прямоугольным профилем рельефа. Глубина ДР составляет порядка нескольких длин волн излучения лазера. В отражённом излучении с помощью диафрагмы выделяется нулевой порядок дифракции и направляется на фотодетектор. Плоскость падения лазерного пучка параллельна линиям рельефа ДР. При наклоне ДР в плоскости падения пучка наблюдаются осцилляции мощности нулевого порядка дифракции. На графике зависимости мощности от угла поворота ДР, представленном на рис. 1, имеются линейные участки, отмеченные цифрами, обеспечивающие пропорциональность выходного сигнала углу поворота диска.

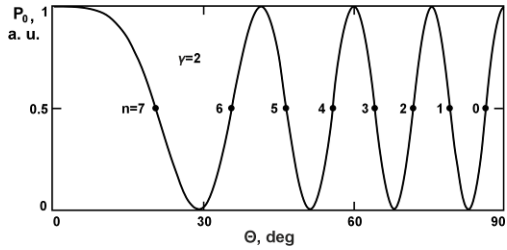


Рис. 1. Зависимость мощности излучения в нулевом порядке дифракции от угла падения на отражательную ДР, коэффициент γ – отношение глубины рельефа ДР к длине волны лазера

Схема с глубокой ДР была также применена при конструировании модулятора лазерного излучения, который описан в [2]. В работе приводятся расчёты параметров датчика и результаты экспериментальных измерений параметров работы макета сейсмометра.

Список литературы

1. Комоцкий В.А., Суетин Н.В. // Оптический журнал. 2022. Т. 89 (5). С. 62.

2. Комоцкий В.А., Соколов Ю.М. Суетин Н.В. // Радиотехника и электроника. 2017. Т. 62 (7). С. 822.

УДК 535(06)+004(06)

Ю.Х. ИСМАНОВ, Н.К. ДЖАМАНКЫЗОВ, С.А. АЛЫМКУЛОВ
Институт физики НАН Кыргызской республики, Бишкек

ЭФФЕКТИВНОСТЬ БРЭГГОВСКОГО СОГЛАСОВАНИЯ В ОБЪЁМНЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ СРЕДАХ

Проведён анализ мультиплексирования голограмм на основе Брэгговского согласования в толстослойных записывающих средах. Описаны механизмы дифракции в трёхмерных решётках, условия для эффективного восстановления голограмм и методы управления характеристиками восстанавливающей волны. Особое внимание уделено влиянию угловых параметров и длины волны на процесс восстановления.

Yu.Kh. ISMANOV, N.K. DZHAMANKYZOV, S.A. ALYMKULOV
Institute of Physics of NAS of Kyrgyz republic, Bishkek

EFFICIENCY OF BRAGG MATCHING IN VOLUMETRIC HOLOGRAPHIC MEDIA

An analysis of hologram multiplexing based on Bragg matching in thick-layer recording media was carried out. The mechanisms of diffraction in three-dimensional gratings, conditions for effective holograms reconstruction and methods for controlling the characteristics of the reconstruction wave are described. Particular attention is paid to the influence of angular parameters and wavelength on the recovery process.

Брэгговское согласование применимо к толстослойным голограммам, где волна, удовлетворяющая условию Брэгга, восстанавливает только одну из множества записанных голограмм. При отклонении от Брэгговского условия дифракционная эффективность резко падает до нулевых величин, что делает данный метод эффективным для выборки нужной голограммы из множества, что важно при мультиплексировании голограмм.

Голограмму, получившуюся при записи в объёмной среде, то есть после экспонирования и проявления, можно описать с. помощью вектора объёмной решётки $M = |M| = 2p / d$, которая получается при суперпозиции предметной и опорной волн с волновыми векторами k и J (рис. 1). Распределение показателя преломления, сформированного в записывающей среде, подчиняется синусоидальному закону в направлении вектора решётки $M = |M|$, который лежит в плоскости yz и

направлен по нормали к плоскостям постоянной фазы. Волна света, в данном случае плоская и монохроматическая, падающая на голограмму при её восстановлении, внутри голограммы распространяется в направлении, задаваемым волновым вектором k, направленный под углом F к оси z. Направление распространения волны после дифракции задается значением вектора J. Для случая, когда $F_1 = F_2 = j$ вектор M направлен параллельно поверхности голограммы, а $k = |k| = a, k_z / a = J_z / a = \cos j_0$.

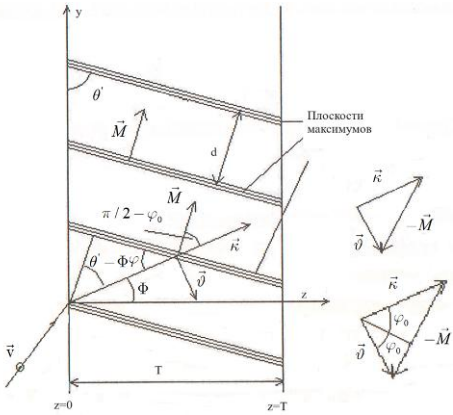


Рис. 1. Схема записи голограммы в объёмной среде

Оценка дифракционной эффективности фазовых голограмм пропускающего типа может быть проведена введением параметров t и e, которые связаны с величинами d, представляющим собой отличие угла распространения восстанавливающей волны от брэгговского угла, параметром a, толщиной слоя l и n_l, представляющим собой приращение показателя преломления, $l_в = nl$ – длиной волны света, падающего на рассматриваемый слой среды, j_0 – брэгговским углом.

$$t = Jal \sin j_0 \quad (1)$$

$$e = pn_l l / l_0 \cos j_0. \quad (2)$$

УДК 535(06)+004(06)

Н.Т. АВЛАСЕВИЧ, А.М. ЛЯЛИКОВ
Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Беларусь

АНАЛИЗ АБЕРРАЦИЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ГОЛОГРАММ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР В НЕКОГЕРЕНТНОМ СВЕТЕ

Исследовано влияния аберраций оптической системы записи голограмм, содержащей дополнительную опорную дифракционную решётку, на качество формируемой голограммы периодической структуры в некогерентном свете. Установлен различный вклад аберраций отдельных оптических элементов, входящих в оптическую схему, в результирующее искажение структуры полос голограммы.

N.T. AVLASEVICH, A.M. LYALIKOV
Y. Kupala Grodno State University, Belarus

ANALYSIS OF ABERRATIONS OF THE OPTICAL SYSTEM FOR FORMING HOLOGRAMS OF PERIODIC STRUCTURES IN INCOHERENT LIGHT

The effect of aberrations of an optical hologram recording system containing an additional reference diffraction grating on the quality of a periodic structure hologram formed in incoherent light has been studied. A different contribution of aberrations of individual optical elements included in the optical scheme to the resulting distortion of the structure of the hologram bands is established.

При формировании голограммы исследуемого объекта для целей голографической интерферометрии аберрации оптической системы оказывают существенное влияние на качество записываемой голограммы [1].

В данной работе проведён теоретический анализ влияния аберраций отдельных оптических компонент, входящих в систему формирования голограмм периодических структур, содержащей дополнительную опорную дифракционную решётку. Особенностью рассматриваемой оптической схемы (рис. 1) является возможность замены лазера на источник света с низкой пространственно-временной когерентностью. Преимуществом данной оптической системы формирования голограмм периодических структур является возможность регулирования величины

и направления полос формируемой голографической структуры [2]. Ранее анализ аберраций таких оптических схем не производился.

В данной работе проведён анализ этапов формирования голограммы периодической структуры с учётом влияния искажений волновых фронтов световых волн, вносимых отдельными оптическими компонентами, входящими в исследуемую оптическую систему.

Получено уравнение распределения интенсивности в плоскости формирования голограммы периодической структуры с учётом аберраций всех элементов оптики, входящих в оптическую схему исследуемого устройства [3].

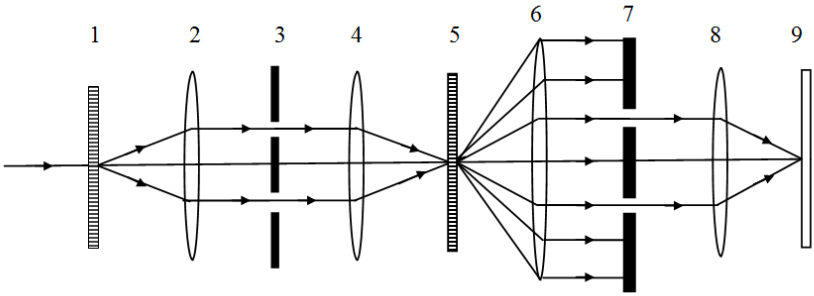


Рис. 1. Оптическая схема записи голограммы одним пучком света:
1 – опорная дифракционная решётка; 2, 4, 6, 8 – объективы; 3, 7 – экраны с отверстиями; 5 – исследуемая периодическая структура; 9 – плоскость формирования голограммы периодической структуры

Установлено, что аберрации отдельных оптических компонент вносят различный вклад в результирующие искажения полос голографической структуры голограммы. Например, установлено, что качество подложки опорной дифракционной решётки, которой дополнена классическая система перезаписи голограмм [1], не оказывает влияние на искажения голографических полос голограммы.

Список литературы

1. Ляликов А.М. Высокочувствительная голографическая интерферометрия фазовых объектов. Гродно: ГрГУ, 2010.

2. Lyalikov A.M., Avlasevich N.T. // Journal of Optical Technology. 2019. V. 86(3). P. 173-176.

3. Ляликов А.М., Авласевич Н.Т. // Вестник ГрГУ им. Янки Купалы. Сер. 2. 2022. № 3. С. 81-87.

УДК 535(06)+004(06)

Г.В. КУЛАК, В.Н. НАВНЫКО, Т.В. НИКОЛАЕНКО
Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина, Беларусь

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА НА ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ФАЗОВЫХ РЕШЁТКАХ В СРЕДЕ «РЕОКСАН» В УСЛОВИЯХ ФРЕНЕЛЕВСКОГО ОТРАЖЕНИЯ

Теоретически исследованы энергетические и поляризационные характеристики дифрагированных волн нулевого и первого порядка при брэгговской дифракции света на голографических фазовых решётках, зарегистрированных в среде «реоксан», со значительной амплитудой изменения показателя преломления регистрирующей среды. Показано, что в условиях френелевского отражения световых волн от границ модулированного слоя и увеличении амплитуды возмущения показателя преломления среды, имеют место значительные изменения энергетических и поляризационных характеристик дифрагированных волн.

G.V. KULAK, V.N. NAUNYKA, T.V. NIKOLAENKO
Mozyr State Pedagogical University named after I.P. Shamyakin, Belarus

DIFFRACTION OF LIGHT BY HOLOGRAPHIC PHASE GRATINGS IN A «REOKSAN» MEDIUM UNDER FRESNEL REFLECTION CONDITIONS

The energy and polarization characteristics of the diffracted zero- and first-order waves in the case of Bragg light diffraction by holographic phase gratings recorded in a «reoksan» medium with a considerable amplitude of the refractive index of the recording medium are theoretically studied. It is shown that under the conditions of Fresnel reflection of the light waves from the modulated layer and an increased amplitude of perturbation of the refractive index of the medium, there are considerable changes in the energy and polarized characteristics.

Показано [1], что в регистрирующей среде «реоксан» возможна запись высокоэффективных пропускающих и отражательных фазовых голограмм при изменения показателя преломления материала среды $\Delta n \sim 5 \cdot 10^{-3}$ и геометрической толщине слоя материала $h \sim 0{,}15\text{-}3$ мм. В настоящей работе теоретически исследованы энергетические и поляризационные характеристики света при брэгговской дифракции на ГР в оптически изотропных средах при учёте френелевского отражения [2] от границ плоскопараллельного слоя. Результаты приведены на рис. 1.

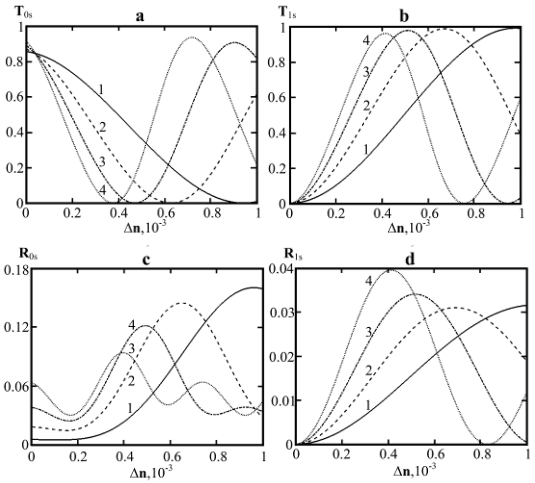


Рис. 1. Зависимости коэффициентов пропускания (T_{0s}, T_{1s}) и отражения ($R_{0s,1s}$) дифрагированной на голографической решётке световой волны в плоскопараллельном слое от фотоиндуцированного изменения показателя преломления Δn при различных толщинах слоя h: 1 (1). 1,5 (2). 2 (3), 2,5 мм (4) (реоксан, показатель преломления слоя – $n_2 = 1{,}49$, показатель преломления покрытия и подложки – $n_1 = n_3 = 1$, $\lambda_0 = 0{,}6328$ мкм, угол падения – $\varphi_1 = 2$ º, азимут поляризации падающего света – $\psi_0 = 45$ º)

С увеличением Δn коэффициент пропускания T_{0s} осциллирует, не достигая максимального значения ($T_{0s} \neq 1$). Изменение коэффициента пропускания T_{1s} имеет характер, близкий к противофазному. Максимальное значение R_{0s} составляет 0,16 (рис. 1c) при $h = 1$ мм, $\Delta n \approx 0{,}95$. При увеличении показателя преломления Δn имеет место амплитудная модуляция коэффициента отражения дифрагированной волны первого порядка (R_{1s}). Азимуты поляризации дифрагированных волн зависят от ψ_0, Δn и h.

Список литературы

1. Шелехов Н.С., Бандюк О.В., Попов А.П., Ребезов А.О. Использование фенантренхинона для формирования фазовых трехмерных голограмм в среде реоксана // Оптическая голография с записью в трехмерных средах: Сб. научн. тр. Л.: Наука, 1986. С. 74-82.

2. Кулак Г.В. // Оптика и спектроскопия. 1994. Т. 76. № 6. С. 1027-1029.

УДК 535(06)+004(06)

В.В. МОГИЛЬНЫЙ, Д.Е. СТАСЕВИЧ, Э.А. ХРАМЦОВ,
А.П. ШКАДАРЕВИЧ[1]
Белорусский государственный университет, Минск
[1]«НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО», Минск, Республика Беларусь

ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТЬ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ФОТОРЕЛЬЕФОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ СЛОЁВ

Экспериментально установлено, что термоустойчивость поверхностных фоторельефов, полученных постэкспозиционной обратимой пластификацией, к действию повышенных температур может быть многократно увеличена фотосшиванием материала сформированной рельефной структуры.

U.V. MAHILNY, D.E. STASEVICH, E.A. KHRAMTSOU,
A.P. SHKADAREVICH[12]
Belarusian State University, Minsk
[1]Scientific and Technical Center «LEMT» of the BelOMO, Minsk

THERMOSTABILITY OF DEFORMATION PHOTORELIEFS ON THE SURFACE OF HOLOGRAPHIC LAYERS

It has been established experimentally that the thermal stability of surface photo-reliefs obtained by post-exposure reversible plasticization to the action of elevated temperatures can be increased many times by photo-crosslinking the material of the formed relief structure.

Голографические решётки в объёме слоёв сополимера с боковыми антраценовыми группами [1] демонстрируют признаки возникающих в их структуре фотоиндуцированных механических напряжений в виде слабого поверхностного фоторельефа. Высокая вязкость среды (низкая подвижность сегментов макромолекул) даже при повышенных температурах не позволяет добиться формирования фоторельефов достаточной высоты для пространственных частот, больших 100 - 200 мм$^{-1}$. Стимулировать деформации удалось в слоях полимерных материалов с фоточувствительными группами и их фотопродуктами, включёнными в макромолекулы, посредством обратимой пластификации, то есть насыщения слоя с записанной решёткой жидким углеводородом для увеличения подвижности полимерных молекул.

Собственная фоточувствительность исследуемого сополимера лежит в ближней УФ-области, но с помощью фотосенсибилизаторов распространяется на весь видимый диапазон. Фоторельефы на его поверхности имеют высоту в несколько десятых долей микрона и разрешающую способность более 1000 мм$^{-1}$. Цель предлагаемого исследования – определение возможностей повышения их термостабильности, необходимой для практического применения в различных оптических технологиях.

В тонких (~ 1 мкм) слоях записывались решётки (рис. 1а) с периодом 8 мкм в спектральном диапазоне 365 - 532 нм (собственное поглощение антраценовых групп и фенантренхинон в качестве фотосенсибилизатора). Высота фоторельефа после обратимой пластификации достигала значений в 20 - 25 % толщины слоя при фотоконверсии антраценовых групп ~ 50 - 70 %. Фоторельефы начинали деградировать вблизи температуры стеклования материала (~ 65 °С). Предполагая, что за деградацию отвечает перемещение сегментов макромолекул, мы попытались затормозить его с помощью фотосшивания материала решёток. После проявления проводилось однородное облучение половины площади каждой решётки светодиодом λ_{max} = 398 нм, которое не приводило к изменениям формы и высоты фоторельефов. Термообработка образца показала, что деградация фоторельефа происходила быстрее на несшитых участках, что уменьшало блеск решёток (рис. 1б). Особенно заметной разница в их поведении становилась, начиная с температур ~ 90 °С, при 105 °С рельефы, не подвергшиеся фотосшиванию полностью стирались в течение ~ 1 ч. (рис. 1в, кривая 1). «Сшитые» фоторельефы деградировали при этом незначительно (кривая 2). Эти результаты подтверждают представления о роли подвижности макромолекул в процессе тепловой деградации деформационных фоторельефов и указывают на возможность их термостабилизации, которая может быть усилена добавкой термо- или фотосшивающих агентов.

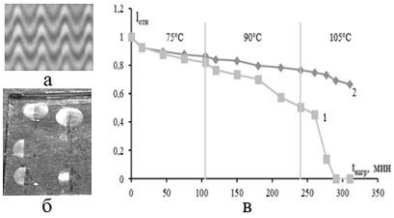


Рис. 1. Форма фоторельефа, наблюдаемого через интерференционный микроскоп (а); вид решёток при естественном освещении после термообработки (б) и кривые деградации относительной высоты рельефа (в)

Список литературы

1. Могильный В.В. и др. // Журнал прикладной спектроскопии. 2021. Т. 88. № 1. С. 159-165.

УДК 535(06)+004(06)

Ю.Х. ИСМАНОВ[1], Т.Д. ТЫНЫШОВА
Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Бишкек
[1]Институт физики НАН Кыргызской республики, Бишкек

СИНТЕЗ МУЛЬТИПЛЕКСНЫХ ГОЛОГРАММ

Предложен алгоритм, который позволяет заменить часть оптического процесса в схеме записи мультиплексных голограмм – запись голограмм – на компьютерный синтез голограмм, которые далее проектируются на оптический носитель. Предложенный алгоритм предназначен в общем случае для синтеза трёхмерных голограмм, однако, в случае использования его для голографических систем хранения информации, можно использовать и его двумерный вариант.

Yu.Kh. ISMANOV[1], T.D. TYNYSHOVA
Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek
[1]Institute of Physics of NAS of Kyrgyz Republic, Bishkek

SYNTHESIS OF MULTIPLEX HOLOGRAMS

An algorithm is proposed that allows replacing part of the optical process in the multiplex hologram recording scheme - hologram recording - with computer synthesis of holograms, which are then projected onto an optical carrier. The proposed algorithm is intended in the general case for the synthesis of three-dimensional holograms, however, in the case of using it for holographic information storage systems, its two-dimensional version can be used.

На первом этапе синтеза голограмм обычно в памяти компьютера формируется информация о записываемом объекте, который впоследствии будет восстановлен из сгенерированной на компьютере голограммы. В нашем конкретном случае это страница, или несколько страниц информации. На следующем этапе обычно рассчитывается последовательность угловых проекций объекта, если объект трёхмерный. Затем, после ряда математических преобразований над указанной последовательностью, получается конечный продукт в виде двумерной комплексной матрицы. На финальном этапе комплексная матрица кодируется на реальный носитель, и полученная позитивная матрица используется как голографический транспарант.

Объект, обозначенный как $t(x_1, y_1, z_1)$, задается в декартовой системе координат. Здесь z_1 продольная ось, то есть виртуальная оптическая ось. Для каждой пары углов φ_m, θ_n, описывающих горизонтальное и

вертикальное направления соответственно рассчитывается m,n-я проекция объекта. Для каждой пары углов φ_m, θ_n проекционное изображение $H_{mn}(x_2, y_2)$ записывается в память компьютера в виде двумерной матрицы, в которой (x_2, y_2) координатная система каждой проекции. Алгоритм синтеза голограмм на компьютере представляет собой имитацию специфической голографической когерентной системы. Поэтому сформированное изображение имеет особенности свойственные изображению, полученному при восстановлении голограммы, записанной когерентным светом.

Трёхмерный объект $t(\mathrm{x}_1\, y_1, \mathrm{z}_1)$ освещается плоской волной, длина которой равна λ, после чего волновой фронт, отражённый от объекта, проходит сквозь сферическую линзу, имеющую фокусное расстояние f. Комплексная амплитуда, полученная в задней фокальной плоскости, задается соотношением

$$g(u,v) = C\iiint t(\mathrm{x}_1\, y_1, \mathrm{z}_1)\exp\{-i\frac{2\pi}{\lambda f}[ux_1 + vy_1 - z_1\frac{u^2+v^2}{2f}]\}dx_1 dy_1 dz_1, \qquad (1)$$

где C – постоянная, а $g(u,v)$ представляет собой фронт комплексной волны, который после интерференции с опорной волной формирует голограмму Фурье.

Предложенный алгоритм синтеза голограмм является обобщённым, так как разработан для трёхмерных объектов. Для случая двумерных объектов, каковыми являются страницы информации в голографических системах хранения данных, алгоритм сводится к частному случаю, при котором одна из переменных, обычно продольная, совпадающая с оптической осью, фиксируется, а число проекций изображения берётся равным единице.

УДК 535(06)+004(06)

Н.Т. АВЛАСЕВИЧ, А.М. ЛЯЛИКОВ
Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Беларусь

ОСТАТОЧНЫЕ АБЕРРАЦИИ В ВОССТАНОВЛЕННЫХ ИНТЕРФЕРОГРАММАХ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ДВУХЭКСПОЗИЦИОННОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Экспериментально оценена величина остаточных аберраций, возникающих из-за изменения настройки полос в восстановленных интерферограммах, при реализации метода двухэкспозиционной голографической интерферометрии при исследовании периодических структур. Установлена и экспериментально подтверждена закономерность изменения величины остаточных аберраций от периода опорных полос в восстановленных интерферограммах.

N.T. AVLASEVICH, A.M. LYALIKOV
Y. Kupala Grodno State University, Belarus

RESIDUAL ABERRATIONS IN RECOVERED INTERFEROGRAMS OBTAINED BY TWO-EXPOSURE HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY OF PERIODIC STRUCTURES

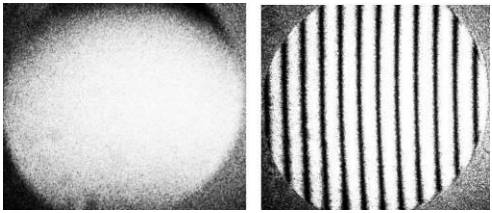
The value of residual aberrations arising from changes in the tuning of bands in recovered interferograms obtained by two-exposure holographic interferometry during the study of periodic structures was experimentally estimated. The pattern of change in the value of residual aberrations from the period of reference bands in the recovered interferograms was established and experimentally confirmed.

В настоящее время особый интерес для различных отраслей науки и техники представляют периодические и квазипериодические структуры. Наиболее перспективным методом их контроля служит голографическая интерферометрия. Ранее был проведён анализ оптических схем формирования двухэкспозиционных голограмм для контроля качества периодических структур. Было установлено, что причины возникновения остаточных аберраций в восстановленных интерференционных картинах при оптической обработке двухэкспозиционной голограммы не зависят от схемы записи голограммы, а величина $\Psi(x,y)$ остаточных аберраций определяется аберрациями $\varepsilon(x,y)$ системы записи голограммы периодической структуры по закону:

$$\Psi(x,y) \approx \frac{\lambda}{\mathrm{T}} \frac{\partial \varepsilon(x,y)}{\partial x},$$

где λ – длина волны при записи голограммы, T – период опорных полос восстановленной интерферограммы [1, 2].

При экспериментальных исследованиях в качестве интерферометра для записи двухэкспозиционных голограмм использовался интерферометр Маха–Цедера с оптикой низкого качества [3]. При этом величина аберраций составляла 11 λ. В качестве объекта использовалась высококачественная амплитудная дифракционная решётка с максимальным отклонением периода решётки P не более 0,05P. Запись голограммы производилась при выделении световой волны, дифрагированной на решётке в первом порядке. При формировании второй экспозиции опорный пучок разворачивался на небольшой угол, что обеспечивало настройку на опорные полосы конечной ширины. На рисунке приведены восстановленные интерферограммы с различными настройками полос.



а *б*

Рис. 1. Восстановленные интерферограммы с различной настройкой опорных полос

Ранее было установлено, что максимальная степень компенсации аберраций соответствует настройке на полосу бесконечной ширины (рис.1*а*), а с уменьшением периода опорных полос остаточные аберрации растут [2]. На рис. 1*б* представлена восстановленная интерферограмма с предельно малым периодом опорных полос, для которого величина остаточных аберраций ещё не превышает 0,1 λ. При дальнейшем уменьшении периода опорных полос величина остаточных аберраций превышает допустимую величину.

Список литературы

1. Авласевич Н.Т., Ляликов А. М. // XII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сб. науч. тр. М.: НИЯУ МИФИ, 2023. С. 614-615.

2. Авласевич Н.Т., Ляликов А. М. // XIII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сб. науч. тр. М.: НИЯУ МИФИ, 2024. С. 597-598.

3. Бекетова А.К., Белозеров А.Ф., Березкин А.Н. и др. Голографическая интерферометрия фазовых объектов. Л.: Наука, 1979.

УДК 535(06)+004(06)

Ю.Х. ИСМАНОВ, Н.К. ДЖАМАНКЫЗОВ
Институт физики НАН Кыргызской республики, Бишкек

МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕ ГОЛОГРАММ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФАЗОВОГО КОДИРОВАНИЯ

Рассмотрен метод мультиплексирования голограмм на основе кодирования фазы, который может быть использован для хранения голографической информации. Предложена возможная схема записи таких голограмм.

Yu.Kh. SMANOV, N.K. DZHAMANKYZOV
Institute of Physics of NAS of Kyrgyz republic, Bishkek

MULTIPLEXING HOLOGRAMS USING PHASE ENCODING

A method of multiplexing holograms based on phase coding is considered, which can be used for storing holographic information. A possible scheme for recording such holograms is proposed.

При мультиплексировании с фазовым кодированием каждый опорный пучок состоит из набора плоских волн со своим фазовым распределением в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны. Используется как бы дискретный набор опорных пучков, однако не раздельно во времени, как при угловом мультиплексировании, а внутри одного пучка, участвующего как при формировании конкретной голограммы, так и при восстановлении волнового фронта с неё. Голограммы мультиплексируются при записи опорными пучками с различными кодами фазы. Если необходимо иметь M опорных пучков, то должен быть использован комплект M ортогональных кодов. Среди таких кодов могут быть использованы как произвольные коды, а также такие, как например, коды Уолша-Адамара.

Одна из возможных схем мультиплексирования с фазовым кодированием представлена на рис. 1. Архитектура хранения с фазово-кодированным мультиплексированием сходна с архитектурой углового мультиплексирования, за исключением того, что сканирующее устройство замещается чисто фазовым пространственным модулятором света (ПМС), а телецентрическая оптика замещается на фурье-преобразующую линзу. При этом объектный пучок, пространственно-модулированный страницей данных, фокусируется на голографическую среду записи. Опорный пучок, состоящий из набора M пучков, каждый из которых имел установленную

заданным образом фазу, фокусируется в среде с углами падения, удовлетворяющими условию Брэгга.

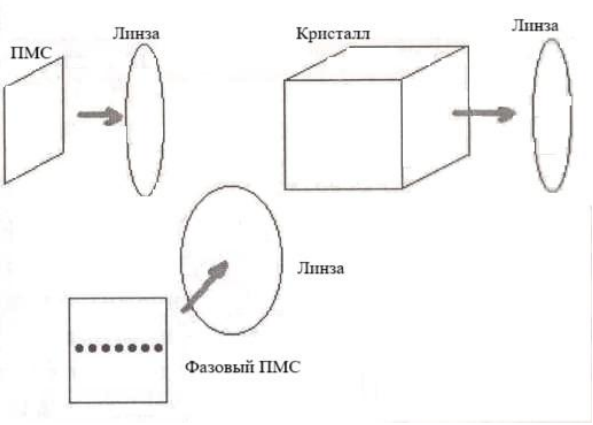


Рис. 1. Схема мультиплексирования с фазовым кодированием

Объектный пучок интерферирует одновременно со всеми составляющими опорного пучка, создавая внутри кристалла голограммы с каждым из них. Каждая хранимая страница данных может быть отдельно восстановлена освещением опорного пучка, с соответствующим фазовым кодом, использованным при записи.

УДК 535(06)+004(06)

А.А. ЖИХОРЕВА, А.В. БЕЛАШОВ, Т.Н. БЕЛЯЕВА[1],
А.В. САЛОВА[1], И.К. ЛИТВИНОВ[1], Е.С. КОРНИЛОВА[1],
И.В. СЕМЕНОВА, О.С. ВАСЮТИНСКИЙ
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
[1]Институт цитологии РАН, Санкт-Петербург

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОТОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА РАКОВЫЕ КЛЕТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФОТОСЕНСИБИЛИЗАТОРОВ РАДАХЛОРИН И ПРОТОПОРФИРИН-IX

С помощью метода цифровой голографической микроскопии проведён неинвазивный мониторинг процесса гибели раковых клеток при использовании фотодинамического воздействия с помощью двух фотосенсибилизаторов порфиринового ряда. Непрерывный голографический мониторинг выборки из нескольких десятков клеток при различных дозах фотодинамического воздействия с использованием двух фотосенсибилизаторов позволил определить условия инициации некроза раковых клеток. Анализ режимов фотодинамического воздействия, инициирующего процессы некроза клеток показал, что применение Радахлорина обеспечивает более сильную реакцию клеток на генерируемые в них активные формы кислорода.

A.A. ZHIKHOREVA, A.V. BELASHOV, T.N. BELYAEVA[1],
A.V. SALOVA[1], I.K. LITVINOV[1], E.S. KORNILOVA[1],
I.V. SEMENOVA[1], O.S. VASYUTINSKII
Ioffe Institute, Saint-Petersburg
[1]Institute of Cytology of the RAS, Saint-Petersburg

APPLICATION OF DIGITAL HOLOGRAPHIC MICROSCOPY FOR COMPARATIVE ANALYSIS OF RADACHLORIN AND PROTOPORPHYRIN IX PERFORMANCE OF CANCER CELLS PHOTODYNAMIC TREATMENT

Digital holographic microscopy has been used for noninvasive monitoring of the cancer cell death induced by photodynamic treatment using two porphyrin photosensitizers. Continuous holographic monitoring of several dozen cells at different doses of photodynamic treatment using Radachlorin and protoporphyrin-IX photosensitizers allowed us to determine the conditions for initiation of cancer cell death

necrosis. Analysis of the photodynamic treatment doses initiating necrosis of cancer cells has shown that usage of Radachlorin photosensitizer provides stronger cell response in comparison with protoporphyrin-IX photosensitizer.

Неинвазивность голографического мониторинга биологических объектов является важным преимуществом методов количественной фазовой визуализации и особенно важна при исследовании фотосенсибилизированных биологических объектов, особенно чувствительных к свету. Анализ таких образцов с помощью обычной флуоресцентной микроскопии требует не только введения флуоресцентных маркеров в клетки, но и их освещения весьма интенсивным излучением, которое может само по себе влиять на образец и искажать результаты эксперимента. В связи с этим для проведения сравнительного анализа эффективности фотодинамического воздействия с использованием разных фотосенсибилизаторов предпочтительно применять менее инвазивные методы, такие как цифровая голографическая микроскопия.

В работе исследованы условия фотодинамического воздействия с использованием двух фотосенсибилизаторов порфиринового ряда, инициирующие процессы некроза в раковых клетках линии HeLa. Для оценки резистивности раковых клеток к фотодинамическому воздействию с использованием двух фотосенсибилизаторов фотосенсибилизированные клетки подвергались воздействию непрерывного УФ-излучения с центральной длиной волны 405 нм в течение пяти минут при разных плотностях мощности этого излучения. Мониторинг нескольких групп клеток до фотодинамического воздействия и на протяжении полутора часов после него позволил оценить динамику изменения среднего фазового набега, вносимого клетками в волновой фронт, и определить факт их гибели от внутриклеточной генерации активных форм кислорода. Наблюдение экспоненциального падения среднего фазового набега на 35 - 45 % от исходного значения свидетельствовало о некрозе клеток и при использовании фотосенсибилизатора Радахлорин наблюдалось уже при плотностях мощности УФ-излучения от 40 мВт/см^2. Использование же фотосенсибилизатора протопорфирин-IX требовало гораздо больших плотностей мощности УФ-излучения для инициации аналогичных изменений среднего фазового набега – массовая гибель клеток наблюдалась лишь при мощностях превышающих 90 мВт/см^2. Также при анализе кинетик уменьшения среднего фазового набега было установлено, что характерное время уменьшения этой величины становится меньше с ростом плотности мощности фотодинамического воздействия.

УДК 535(06)+004(06)

Т.В. РЕЗЦОВ[1], А.В. ЧЕРНЫХ[1], И.Г. СТЕПАНОВ[1], Н.В. ПЕТРОВ[1], Т.Н. ОРЛОВА[1,2]
[1]Университет ИТМО, Санкт-Петербург
[2]Ереванский государственный университет, Армения

ГЕНЕРАЦИЯ И ИЗУЧЕНИЕ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР В ХИРАЛЬНЫХ НЕМАТИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ

В данной работе исследуются топологические структуры в хиральных нематических жидких кристаллах, возникающие под воздействием лазерного излучения. Особое внимание уделено анализу влияния таких структур, как тороны, на параметры проходящего света, включая амплитуду, фазу и поляризацию. Для исследования используется цифровая голографическая микроскопия.

T.V. REZTSOV[1], A.V. CHERNYKH[1], I.G. STEPANOV[1], N.V. PETROV[1], T.N. ORLOVA[1,2]
[1]ITMO University, Saint-Petersburg
[2]Yerevan State University, Armenia

GENERATION AND STUDY OF TOPOLOGICAL STRUCTURES IN CHIRAL NEMATIC LIQUID CRYSTALS USING DIGITAL HOLOGRAPHIC MICROSCOPY

This study investigates topological structures in chiral nematic liquid crystals induced by laser radiation. Particular attention is given to analyzing the influence of such structures, such as torons, on the parameters of transmitted light, including amplitude, phase, and polarization. Digital holographic microscopy is used for the investigation.

Жидкие кристаллы (ЖК) находят широкое применение в дисплейных технологиях благодаря тому, что сочетают в себе упорядоченность структуры твёрдых тел и текучесть жидкостей. Особое строение жидких кристаллов позволяет управлять характеристиками света при управлении полем директора, описывающего направление преобладающей ориентации молекул ЖК. Так, например, в нематической фазе молекулы ЖК сохраняют преимущественно параллельную ориентацию своих длинных осей, в то время как их центры масс остаются неупорядоченными. Это сочетание приводит к тому, что молекулы

способны перемещаться свободно, одновременно поддерживая усреднённое направление ориентации.

Однако в хиральных нематиках, молекулы которых формируют спиральную структуру, возможна генерация различных топологических структур, например, за счёт локализованного перехода в изотропную фазу. Одной из таких структур являются тороны (рис. 1). Такие структуры могут оказывать влияние на свет в результате возникновения дополнительных эффектов, связанных с неоднородностью ориентации директора в пространстве. Это может приводить к изменениям в фазе, амплитуде и поляризации света. Такие системы могут использоваться в более специализированных приложениях, включая сенсоры [1] и элементы оптической обработки [2, 3].

В данной работе изучается влияние различных сформированных структур (рис. 1) на параметры проходящего света, включая амплитуду, фазу и поляризацию. Для изучения используется метод цифровой голографической микроскопии, позволяющий получать данные с высокой точностью. Структуры генерировались путем локального нагрева ЖК-ячейки под воздействием сфокусированного инфракрасного излучения. В данном исследовании использовались жидкие кристаллы 5CB (4'-пентил-4-цианобифенил) и E7 в смеси с хиральной добавкой S811.

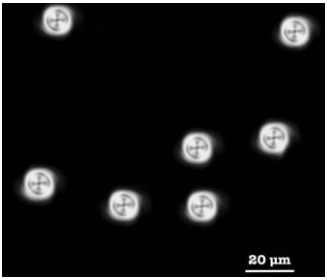


Рис. 1. Изображение торонов в ЖК (E7+S811), полученное в поляризационном микроскопе при скрещённых поляризаторах

Авторы выражают благодарность за финансовую поддержку Министерству науки и высшего образования Российской Федерации (№ FSER-2025-0007).

Список литературы

1. Paterson D.A., et al. // Mol. Syst. Des. & Eng. 2022. V. 7(6). P. 607-621.
2. Poy G.., et al. // Nature Photonics. 2022. V. 21. P. 1177-1184.
3 Hess A.J., et al. // Phys. Rev. X. 2020. V. 10. P. 031042.

УДК 535(06)+004(06)

М.В. БЕЛАШОВ[2], А.А. ЖИХОРЕВА, А.В. БЕЛАШОВ,
Т.Н. БЕЛЯЕВА[1], А.В. САЛОВА[1], И.К. ЛИТВИНОВ[1],
Е.С. КОРНИЛОВА[1], И.В. СЕМЕНОВА, О.С. ВАСЮТИНСКИЙ
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
[1]Институт цитологии РАН, Санкт-Петербург
[2]Университет ИТМО, Санкт-Петербург

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КЛЕТОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НИЗКОКОГЕРЕНТНОЙ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ И ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ

Проведена оценка точности определения основных морфологических параметров клеток с использованием цифровой голографии и голографической томографии. Для контроля точности определения средней высоты, объёма и площади поверхности мембраны клеток различных типов использовалась конфокальная флуоресцентная микроскопия с z-сканированием клеток, позволившая восстановить трёхмерные изображения клеток, предварительно накопивших флуоресцентный краситель.

M.V. BELASHOV[2], A.A. ZHIKHOREVA, A.V. BELASHOV,
T.N. BELYAEVA[1], A.V. SALOVA[1], I.K. LITVINOV[1],
E.S. KORNILOVA[1], I.V. SEMENOVA[1], O.S. VASYUTINSKII
Ioffe Institute, Saint-Petersburg
[1]Institute of Cytologyof the RAS, Saint-Petersburg
[2]ITMO University, Saint-Petersburg

INVESTIGATION OF LIVE CELLS MORPHOLOGY EVALUATION ACCURACY USING INCOHERENT DIGITAL HOLOGRAPHIC MICROSCOPY AND HOLOGRAPHIC TOMOGRAPHY

Accuracy of major morphological parameters evaluation using digital holographic microscopy and tomography is estimated. Z-scanning confocal fluorescence microscopy was used as a reference method for evaluation average height, volume and surface area.

Одним из наиболее широко распространённых методов измерения морфологических параметров является конфокальная флуоресцентная микроскопия, позволяющая при помощи флуоресцентных меток и

z-сканирования образца определить трёхмерную форму клетки и затем рассчитать её параметры. В то же время подобное сканирование может занимать несколько минут, что значительно затрудняет мониторинг большого количества клеток. Методы голографии и голографической томографии позволяют намного быстрее анализировать характеристики клеток, связанные с их морфологией: восстановление распределения показателя занимает лишь несколько секунд, а фазовое изображение может быть восстановлено за несколько десятков миллисекунд.

В настоящей работе нами был проведён анализ точности определения основных морфологических параметров клеток (средняя высота, объём, площадь мембраны) с помощью низкокогерентной голографической микроскопии и голографической томографии. Применение цифровой голографической микроскопии позволяет измерить лишь интегральный фазовый набег, вследствие чего восстановление трёхмерного изображения клеток возможно лишь в предположении о постоянстве показателя преломления внутриклеточной среды. Голографическая томография, предполагающая анализ интегральных фазовых распределений при разных направлениях распространения волны, позволяет анализировать трёхмерное распределение показателя преломления целиком и непосредственно выделять внутриклеточное пространство, обладающее показателем преломления большим чем окружающая среда. Однако ограниченный диапазон углов сканирования приводит к возможному появлению дефектов, что ограничивает продольное пространственное разрешение таких данных и затрудняет их последующий анализ для сегментации отдельных клеток.

В результате анализа морфологических характеристик клеток линии HeLa было установлено, что их средний объём составляет 4300 мкм^3, площадь поверхности мембраны 2200 мкм^2, а средняя высота 7.4 мкм. Оценка погрешностей определения этих параметров с помощью голографических методов показала, что погрешности определения объёма и высоты клеток с помощью низкокогерентной голографии и голографической томографии весьма близки и составляют около 11 - 14 %. В то же время погрешность определения площади мембраны с помощью цифровой голографии оказывается значительно выше и может достигать 35 %, в отличие от аналогичной погрешности для голографической томографии в 17 %. Таким образом, выбор конкретного подхода для анализа морфологии цитологического образца должен основываться на конкретных задачах и интересуемых параметрах.

УДК 535(06)+004(06)

А.П. ФАЩЕВСКИЙ, В.П. РЯБУХО[1]
Национальный исследовательский Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
[1]*Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов*

СТАТИСТИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИН ВОЛНОВЫХ ЦУГОВ НЕМОНОХРОМАТИЧЕСКОГО СВЕТА И ДЛИНА ЕГО ВРЕМЕННОЙ КОГЕРЕНТНОСТИ

С использованием математического моделирования проведено сравнение длины временной когерентности света и длин его волновых цугов. Установлено, что длина временной когерентности соответствует минимальным длинам волновых цугов.

A.P. FASHCHEVSKII, V.P. RYABUKHO[1]
Saratov State University
[1]*Institute of Precision Mechanics and Control of the RAS, Saratov*

STATISTICAL DISTRIBUTION OF THE WAVETRAIN LENGTHS OF NON-MONOCHROMATIC LIGHT AND THE LENGTH OF ITS TEMPORAL COHERENCE

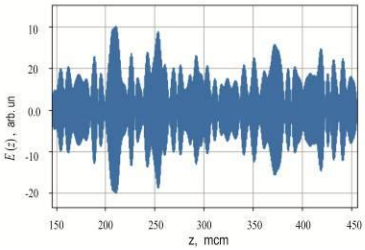
Using mathematical modeling, a comparison was made between the length of temporal coherence of light and the lengths of its wave trains. It was found that the length of temporal coherence corresponds to the minimum lengths of wave trains.

Временная когерентность света зависит от ширины его частотного спектра $\Delta\lambda$ и длина временной когерентности l_c обратно пропорциональна ширине спектра, $l_c \approx (\lambda_0)^2/\Delta\lambda$. Длина l_{train} и время $\Delta\tau_{\text{train}}$ волновых цугов колебаний немонохроматического поля имеют статистических характер и непостоянны в пространстве и во времени [2].

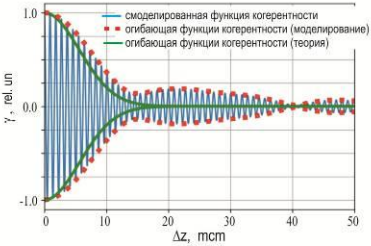
Цель работы состояла в выявлении соотношения между длиной временной когерентности и длинами волновых цугов немонохроматического направленного пучка света.

Поле оптического излучения $E(z,t)$ вдоль направления его распространения z можно представить в виде суперпозиции синусоидальных колебаний с разными фазами и амплитудами спектральных составляющих [2]. Численно смоделированы колебания немонохроматического волнового поля (рис. 1*a*) и определены длины когерентности, волновых цугов и функция плотности распределения длин

цугов. Для расчёта длины когерентности рассчитана функция корреляция колебаний поля $\Gamma(\Delta z) = \langle E(z)E(z-\Delta z)\rangle$ и степень когерентности $\gamma(\Delta z) = \Gamma(\Delta z)/\Gamma(0)$. По огибающей $\gamma(\Delta z)$ получены длины когерентности l_c для разных уровней $|\gamma(\Delta z)|$: $|\gamma_1| = 0{,}5$, $|\gamma_2| = \exp(-1)$, $|\gamma_3| = \exp(-2.3)$. Функция степени когерентности (рис. 1б) сопоставлялась с теоретической (рис. 1*б*), получаемой по теореме Винера-Хинчина [1].



а



б

Рис. 1. Колебания немонохроматического волнового поля (*а*) и степень когерентности (*б*) при ширине спектра 100 нм и $\lambda_0 = 920$ нм

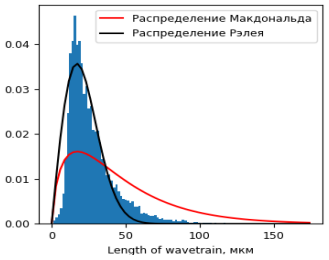


Рис. 2. Гистограмма длин волновых цугов

Длины цугов рассчитывались по огибающей колебаний поля $E(z)$, по которой выделялись отрезки по длине отдельного цуга. Для б*о*льшого числа длин цугов моделировалось несколько сотен реализаций колебаний $E_n(z)$, получаемых при различных фазах спектральных компонент. На рис. 2 представлена гистограмма длин цугов, полученная при $\Delta\lambda = 100$ нм и $\lambda_0 = 920$ нм.

Распределение длин цугов асимметрично и лучше всего соотносится с распределением Рэлея. Выбраны три значения длин волновых цугов - $l_{мин}$, $l_{макс}$ и $l_{ср}$: $l_{мин}$ и $l_{макс}$ соответствуют средним значениям в диапазонах минимальных и максимальных длин цугов. Установлено, что длина когерентности l_c при степени когерентности $|\gamma|=\exp(-2{,}3)$ с наибольшей точностью совпадает не со средней или максимальной, а с минимальной $l_{мин}$ длиной волновых цугов.

Список литературы

1. Mandel L., Wolf E. Optical Coherence and Quantum Opticsıo New York, 1995.
2. Wolf E. Introduction to the Theory of Coherence and Polarization of Light. New York, 2007.

УДК 535(06)+004(06)

Д.Г. ДЕНИСОВ, Д.А. МАШОШИН
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕПЕНИ ВЫРОЖДЕНИЯ КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ КАК МОДЕЛИ ОПИСАНИЯ ЧАСТИЧНО-КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Проанализированы результаты теоретических исследований, посвящённых изучению когерентных свойств источников оптического излучения. Рассмотрены понятия площади и объёма квантово-механической ячейки в некоторой области пространства для определённого источника оптического излучения. Для анализируемого объёма когерентности рассмотрено среднее число фотонов в определённом спиновом состоянии, определяющее в квантовой статистике параметр вырождения лазерного излучения. Представлена в первом приближении связь контраста спекл-структуры в приближении моментов низшего порядков амплитуды электромагнитного поля в распределении интенсивности рассеянного лазерного излучения со среднеквадратическим отклонением параметров шероховатости исследуемой поверхности и временной когерентностью излучения.

D.G. DENISOV, D.A. MASHOSHIN
Bauman Moscow State Technical University

INVESTIGATION OF THE DEGREE OF DEGENERACY OF A QUANTUM MECHANICAL CELL AS A MODEL FOR DESCRIBING PARTIALLY COHERENT RADIATION

The results of theoretical studies devoted to the study of coherent properties of optical radiation sources are analyzed. The concepts of the area and volume of a quantum mechanical cell in a certain area of space for a specific optical radiation source are considered. For the analyzed amount of coherence, the average number of photons in a certain spin state is considered, which determines the degeneracy parameter of the laser radiation in quantum statistics. The relationship of the contrast of the speckle structure in the approximation of the moments of the lowest orders of magnitude of the electromagnetic field in the intensity distribution of scattered laser radiation with the standard deviation of the roughness parameters of the studied surface and the temporal coherence of the radiation is presented in a first approximation.

Как известно все источники оптического излучения характеризуются не только определёнными пространственно-угловыми характеристиками, но спектральными и когерентными свойствами [1 - 4]. Так, например, при рассмотрении физических процессов интерференции важными являются

проявления временной когерентности между двумя пучками, поскольку формируемый контраст интерферограммы зависит от времени задержки между этими пучками. В свою очередь произведение времени задержки на ширину полосы спектральной линии источника излучения должно быть менее единицы, что в свою очередь определяет время и длину когерентности источника излучения. При суперпозиции как минимум двух пучков оптического излучения с учётом фазовых соотношений, между ними определяющим образом влияет пространственная когерентность, характеризующая расстояние между двумя осциллирующими источниками (вторичными источниками). Результат суперпозиции наблюдается в некоторой плоскости локализации интерференционных полос, удалённой от вторичных источников на определённом расстоянии. Площадь анализируемой плоскости локализации называют площадью когерентности оптического излучения, а квадратный корень из данной величины определяет поперечную длину когерентности. Допуская, что электромагнитное поле представляет собой плоскую квазимонохроматическую, линейно поляризованную волну, можно показать, что прямой цилиндр, основанием которого является площадь когерентности, высотой равной продольной когерентности определяет объём когерентности некоторой квантово-механической ячейки в пространстве. В данном объёме может содержаться определённое количество фотонов. Важно отметить, что параметр вырождения определяющим образом будет влиять на временную и пространственную когерентности лазерного излучения при его взаимодействии с объектом (предметом), имеющим неоднородный профиль поверхности, а значить определять условия формирования пространственной спекл-структуры. Контраст спекл-структуры в свою очередь может быть определён в приближении моментов низшего порядков амплитуды электромагнитного поля в зависимости от временной когерентности лазерного излучения и величины среднеквадратического отклонения высотного параметра шероховатости профиля.

Список литературы

1. Ларкин А.И., Юу Ф.Т.С. Когерентная фотоника. М.: БИНОМ. 2006.

2. Вольф Э., Мандель Л.. Когерентные свойства оптических полей // Успехи физических наук. 1965. Т. 87. Вып. 3. С. 491-520.

3. Денисов Д.Г., Карасик В.Е., Орлов В.М. Измерения параметров микронеровностей крупногабаритных шлифованных поверхностей оптических деталей при помощи лазерной интерферометрии // Метрология. 2009. № 9. С. 15-24.

4. Goodman J.W. Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications. Roberts and Company Publishers, 2007.

УДК 535(06)+004(06)

Д.В. ПАВЛЕНКО, Р.С. СТАРИКОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

О ВОЗМОЖНОСТЯХ МАНИПУЛЯЦИИ ФОРМОЙ МАКСИМУМА ВЗАИМНОКОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ ПРИ СИНТЕЗЕ ФИЛЬТРОВ С МИНИМИЗАЦИЕЙ ЭНЕРГИИ КОРРЕЛЯЦИИ

Приведены результаты компьютерного моделирования синтеза инвариантных фильтров с минимизацией средней энергии корреляции со сглаживающими функциями, формирующими заданный вид максимума взаимокорреляционой функции. Приведены результаты моделирования применения таких фильтров при решении задачи бинарной классификации.

D.V. PAVLENKO, R.S. STARIKOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

ON THE POSSIBILITIES OF SHAPING OF THE CROSS-CORRELATION FUNCTION MAXIMUM IN THE SYNTHESIS OF MACE FILTERS

The results of computer simulation of MACE filter with smoothing functions are presented. The results of modeling the application of such filters in solving the problem of binary classification are presented.

Целью работы является изучение возможностей влияния контроля формы взаимокорреляционной функции на точность распознавания. В работе используется инвариантный фильтр с минимальной средней энергией корреляции.

Фильтры были синтезированы аналогично [1], но модифицированы путём добавления двумерных сглаживающих функций различной формы. При синтезе каждого фильтра использовались 36 полутоновых изображений объекта, подвергнутого повороту вне плоскости. (рис. 1).



Рис. 1. Примеры изображений объектов, использованных в работе

Были расчитаны взаимокорреляционные функции фильтра с изображениями объектов истинного и ложного классов (рис. 2). Для объектов истинного класса заданная форма отклика сохранялась в большей степени, чем для ложного, вне зависимости от ракурса объекта. Проведена оценка применения меры сходства полученных откликов для распознавания, пример приведён на рис. 3.

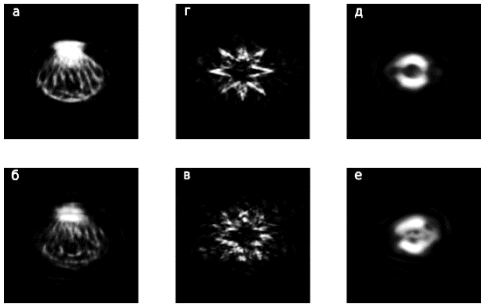


Рис. 2. Примеры взаимокорреляционных функций фильтра: для истинного (а, г, д) и ; для ложного (б, в, е) объектов

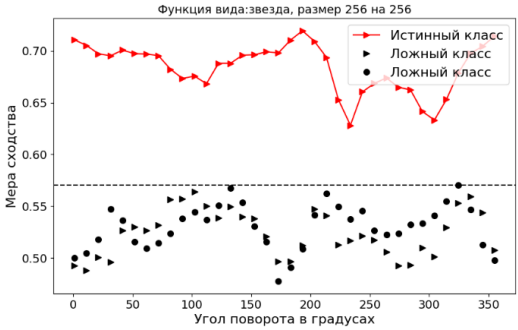


Рис. 3. Зависимость меры сходства полученной взаимокорреляционной функции и использованной при синтезе сглаживающей функции от угла поворота объекта на входном изображении

Работа выполнена при поддержке РНФ, грант № 23-12-00336.

Список литературы

1. Casasent D., Ravichandran G., Bollapragada S. Gaussian minimum average correlation energy filters // Applied Optics. 1991. V. 30. P. 5176-5181.

УДК 535(06)+004(06)

С.В. ВАСИЛЬЕВ
Военно-воздушная академия им проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, Воронеж

ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ РОТОРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕГО ФАЗОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА

Рассматривается новый подход к решению задачи идентификации контрастных областей на полутоновых изображениях. Введено понятие роторной характеристики, представляющей собой амплитуды синусоид ротора фазоэнергетического спектра изображения, показана связь её экстремальных значений с пространственным положением объектов. Сформулированы основные свойства модифицированной роторной характеристики фазоэнергетического спектра. Установлено, что в отличие от других характеристик, используемых в энергетическом анализе изображений, роторная характеристика содержит информацию о форме объектов.

S.V. VASILYEV
Air Forces Academy named after Prof. N.E. Zhukovskiy and Yu.A. Gagarin, Voronezh

IMAGE PROCESSING BASED ON THE ROTARY CHARACTERISTIC OF ITS PHASE-ENERGY SPECTRUM

A new approach to solving the problem of identifying contrasting areas in halftone images is considered. The concept of the rotor characteristic, which is the amplitude of the rotor sinusoids of the phase-energy spectrum of the image, is introduced, and the relationship of its extreme values with the spatial position of objects is shown. The main properties of the modified characteristic of the phase-energy spectrum are formulated. It is established that, unlike other characteristics used in energy analysis of images, the rotary characteristic contains information about the shape of objects.

В практических приложениях задачу распознавания образов на изображениях принято разделять на задачи локализации и классификации [1]. При этом весьма эффективно применяются методы, основанные на анализе формы отображений объектов и её особенностей. В статье предложен конкурентный по вычислительным затратам способ определения формы относительно простых объектов на изображениях, основанный на анализе дифференциальных характеристик фазоэнергетического спектра [2].

Фазоэнергетический спектр (ФЭС) является двумерным векторным полем и определяется как

$$\vec{I}\left(\varphi_x,\varphi_y\right)=\left\{I_x\left(\varphi_x,\varphi_y\right);I_y\left(\varphi_x,\varphi_y\right)\right\},$$

$$I_x\left(\varphi_x,\varphi_y\right)=\sum_{k=-M}^{M}\sum_{l=-N}^{N}\sum_{r=-M}^{M}\sum_{p=-N}^{N} l\, f\left(k,l\right) f\left(r,p\right)\cos\left(\left(k-r\right)\varphi_x+\left(l-p\right)\varphi_y\right).$$

$$I_y\left(\varphi_x,\varphi_y\right)=\sum_{k=-M}^{M}\sum_{l=-N}^{N}\sum_{r=-M}^{M}\sum_{p=-N}^{N} p\, f\left(k,l\right) f\left(r,p\right)\cos\left(\left(k-r\right)\varphi_x+\left(l-p\right)\varphi_y\right).$$

$\varphi_x\in[-\pi;\pi],\varphi_y\in[-\pi;\pi]$ – нормированные пространственные частоты, $f\left(i,j\right)$ – матрица неотрицательных отсчетов кадра. Поле ФЭС является плоским, поэтому его ротор является скалярным полем

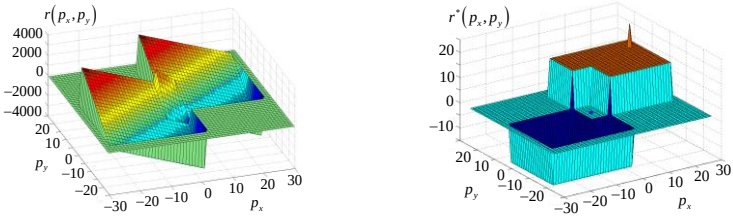
$$\left(rot\vec{I}\left(\varphi_x,\varphi_y\right)\right)_z=2\sum_{k=-M}^{M}\sum_{r=-M}^{N}\sum_{l=-M}^{M}\sum_{p=-M}^{N}\left(rl-kp\right)f\left(k,r\right) f\left(l,p\right)\cdot$$

$$\sin\left(k\varphi_x+r\varphi_y\right)\cos\left(l\varphi_x+p\varphi_y\right).$$

Коэффициенты при пространственных гармониках представляют собой роторную характеристику

$$r\left(p_x,p_y\right)=\sum_m\sum_n\left(np_x-mp_y\right)f_{m,n}\left(f_{p_x-m,p_y-n}-f_{m-p_x,n-p_y}\right).$$

На рис. 1 показана роторная характеристика ФЭС видеосигнала изображения, представляющего собой кадр равномерной яркости, содержащий один контрастный пиксель. В фазовой плоскости каждый объект изображения формирует отклик в виде локального максимума в точке, координаты которой соответствуют удвоенным пространственным координатам геометрического центра объекта.



а *б*

Рис. 1. Роторная (*а*) и модифицированная (*б*) роторная характеристика ФЭС

Список литературы

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2019.

2. Обработка многомерных сигналов: в 2 книгах. Кн. 1. Линейная многомерная дискретная обработка сигналов. Методы анализа и синтеза / Под ред. А.В. Богословского. М.: Радиотехника, 2013.

УДК 535(06)+004(06)

Л.А. МАКСИМОВА, Д.В. ЛЯКИН, Н.Ю. МЫСИНА, В.П. РЯБУХО
Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов

КОРРЕЛЯЦИИ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ С ШИРОКИМ УГЛОВЫМ СПЕКТРОМ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ГАРМОНИК ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ИНТЕРВАЛАХ ВАРИАЦИИ ИХ ФАЗ

Численно выполнено моделирование пространственного распределения комплексной амплитуды волнового поля с широким угловым спектром пространственных гармоник при интервалах вариации случайных начальных фаз гармоник в диапазоне от 0 до 2π радиан. Установлено, что поперечная когерентность квазимонохроматического волнового поля определяется величиной числовой апертуры и формой его углового спектра и не изменяется при изменении интервала вариации случайных фаз гармоник.

L.A. MAKSIMOVA, D.V. LYAKIN, N.Yu. MYSINA, V.P. RYABUKHO
Institute of Precision Mechanics and Control of the RAS, Saratov

CORRELATIONS OF THE WAVE FIELD WITH A WIDE ANGULAR SPECTRUM OF SPATIAL HARMONICS AT VARIOUS INTERVALS VARIATIONS OF THEIR PHASES

The spatial distribution of the complex amplitude of a wave field with a wide angular spectrum of spatial harmonics has been numerically simulated at intervals of variation of random initial phases of harmonics in the range from 0 to 2π radians. It is established that the lateral coherence of a quasi-monochromatic wave field is determined by the value of the numerical aperture and the shape of its angular spectrum and does not change with a change of the interval variation of random phases of harmonics.

В работе был выполнен численный эксперимент по исследованию процессов формирования спекл-структур в поперечном сечении волнового поля с постепенным увеличением интервала случайных начальных фаз φ_0 плоских волн, из совокупности которых формируется волновое поле:

$$E(x,y,z,t=0) \sim \sum_{k=k_1}^{k_2} \sum_{k_y=k_{y\min}}^{k_{y\max}} \sum_{k_x=k_{x\min}}^{k_{x\max}} g(k) A(k_x,k_y) P(k_x,k_y) \exp\left(\varphi_0(k_x,k_y)\right) \times$$
$$\times \exp\left[i\left(k_x x + k_y y + k_z z\right)\right],$$

где $g(k)$ - частотный спектр, $P(k_x, k_y)$ - функция апертуры углового спектра волнового поля, $E(k_x, k_y) = A(k_x, k_y)\exp(\varphi_0(k_x, k_y))$ - комплексная амплитуда плоской волны, k_x, k_y и k_z - пространственные частоты. Фрагменты сформированных спекл-структур при различных интервалах $\Delta\varphi$ случайных начальных фаз представлены на рис. 1.

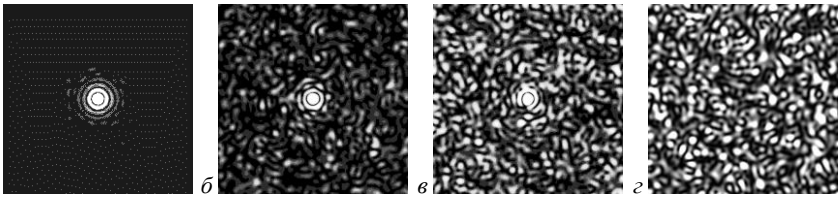


Рис. 1. Смоделированные спекл-картины волнового поля в поперечном сечении для круглой апертуры; интервал случайных начальных фаз $\Delta\varphi$ и яркость спекл-картины: 0,4π, 95 % (*а*); 1,2π, 95 % (*б*); 1,4π, 95 % (*в*); 2π, 30 % (*г*); λ_0 = 0,55 мкм, числовая апертура NA_i = 0,5; размер фрагментов спекл-картин 20 х 20 мкм

Как видно из рис. 1, развитое спекл-поле формируется при интервале распределения случайных начальных фаз $\Delta\varphi = 2\pi$ радиан (рис. 1*г*), при меньшем интервале $\Delta\varphi$ наблюдается ярко выраженный максимум нулевого порядка интерференции (рис. 1*а*, *б*, *в*). При увеличении интервала $\Delta\varphi$ наблюдается постепенное уменьшения максимума интенсивности в центре картины и переход к развитой спекл-картине при интервале $\Delta\varphi = 2\pi$ радиан. Для смоделированных волновых полей, соответствующих фрагментам спекл-картин, представленным на рис. 1, были построены функции поперечной корреляции [1, 2], которые показали, что длины поперечной корреляции поля практически совпадают при всех интервалах случайных начальных фаз плоских волн $\Delta\varphi$.

Результаты численного моделирования показывают, что поперечная длина когерентности квазимонохроматического волнового поля, получаемого при суперпозиции плоских волн с разными случайными фазами φ_0, не изменяется при изменении интервала разности начальных фаз гармонических составляющих поля, а зависит от ширины и формы углового спектра волнового поля.

Список литературы

1. Рябухо В.П., Максимова Л.А., Мысина Н.Ю., Лякин Д.В., Рябухо П.В. // Оптика и спектроскопия. 2019. Т. 126 (2). С. 186.

2. Максимова Л.А., Рябухо В.П. // Сб. научн. трудов: XIII Межд. конф. по фотонике и информационной оптике. М.: НИЯУ МИФИ. 2024. С. 603.

УДК 535(06)+004(06)

А.А. ВОЛКОВ, Ф.А. УШАКОВ, Е.К. ПЕТРОВА, Е.Ю. ЗЛОКАЗОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОСКОРОСТНОГО МИКРОЗЕРКАЛЬНОГО МОДУЛЯТОРА СВЕТА В СХЕМЕ 4F-КОРРЕЛЯТОРА

В работе исследована пространственно-временная модуляция с частотой до 13 кГц в схеме 4F-коррелятора при использовании излучения с длиной волны 639 нм. Выявлен ряд неописанных в эксплуатационной документации особенностей работы высокоскоростного модулятора с разрешением 2560 × 1600 пикселов и максимальной частотой отображения кадров 12987 Гц.

A.A. VOLKOV, F.A. USHAKOV, E.K. PETROVA, E.Yu. ZLOKAZOV
National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

EXPERIMENTAL STUDY OF CHARACTERISTICS OF HIGH-SPEED MICROMIRROR DEVICE IN 4F-CORRELATOR SCHEME

This paper studies spatial modulation with a frequency of up to 13 kHz in a 4F-correlator circuit using radiation with a wavelength of 639 nm. A number of features of the high-speed modulator with a resolution of 2560 × 1600 pixels and a maximum frame display frequency of 12987 Hz that were not described in the operating documentation are revealed.

Микрозеркальные модуляторы света широко применяются в различных прикладных задачах. В частности, пространственно-временная модуляция когерентных световых полей регулярно используется в дифракционных оптических системах обработки информации, в том числе и в оптических нейронных сетях [1]. Характеристики применяемых модуляторов излучения, а именно частота отображения кадров, пространственное разрешение, параметры временной динамики [2], оказывают значительное влияние на производительность оптических систем обработки данных.

В работе исследуется пространственно-временная модуляция излучения в экспериментальной схеме 4F-коррелятора, приведённой на рис. 1. В качестве источника излучения используется DPSS-лазер Pr:YLF с удвоением частоты генерации (639 нм). В схеме 4F-коррелятора

используются два пространственно-временных модулятора. В ходе эксперимента на модулятор *3* выводятся исходные изображения, на модуляторе *5*, который является исследуемым, отображаются дифракционные оптические элементы. Результирующее распределение интенсивностей регистрируется широкоформатной цифровой камерой.

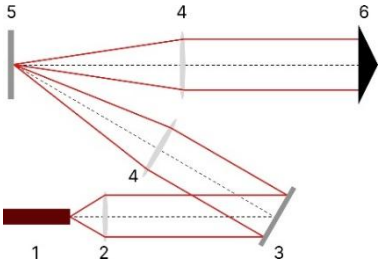


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (4F-коррелятора):
1 – DPSS-лазер, *2* – система 4F-фильтрации, *3* – модулятор для ввода изображений, *4* – плоские линзы, *5* – исследуемый модулятор, *6* – цифровая фотокамера

Для измерения параметров динамики модуляции вместо фотокамеры устанавливается фотодиод в фотогальваническом режиме. При измерении происходит переключение микрозеркал между активным и неактивным состояниями с заданной частотой. Получено, что время переключения зеркал модулятора из неактивного состояния в активное не превышает 5 мкс, продолжительность обратного переключения составляет менее 20 мкс. Отмечено появление пульсаций и артефактов в выключенном режиме, вызванных действием системы, компенсирующей погрешности угла поворота зеркал.

Таким образом, подтверждена возможность применения микрозеркального модулятора с указанными характеристиками в схеме 4F-коррелятора для формирования дифракционных оптических полей с частотами отображения кадров до 13 кГц.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 23-12-00336.

Список литературы

1. Xu R., Lv P., Xu F., Shi Y. A survey of approaches for implementing optical neural networks // Optics & Laser Technology. 2021. V. 136. P. 106787 ()

2. Евтихиев Н.Н., Краснов В.В., Рябцев И.П. и др. Измерение модуляции фазового жидкокристаллического модулятора света Santec SLM-200 и анализ его применимости для реконструкции изображений с дифракционных элементов // Измерительная техника. 2021. № 5. С. 4-8.

УДК 535(06)+004(06)

Е.К. БАЛАНДИН, А.В. КОЗЛОВ, П.А. ЧЕРЁМХИН,
Н.Н. ЕВТИХИЕВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРИК ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ВОССТАНОВЛЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ИЗ ГОЛОГРАММ

Корректная оценка качества изображений и реконструкций 2D и 3D-сцен – сложная задача для многих оптико-цифровых задач. Наилучшие результаты показали коэффициент корреляции, индекс структурного сходства и его модификации для оценки качества изображений, восстановленных из голограмм.

E.K. BALANDIN, A.V. KOZLOV, P.A. CHEREMKHIN,
N.N. EVTIKHIEV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

EVALUATING QUALITY METRICS OF IMAGES RECONSTRUCTED FROM HOLOGRAMS

Correct assessing quality of image and reconstructed 2D and 3D-scenes is a significant task in optical-digital applications. Correlation coefficient, structural similarity index and its modification provide the best results for quality assessment of images reconstructed from holograms.

В задачах повышения качества, фильтрации и сжатия изображений, в том числе восстановленных из голограмм, требуются корректно оценивать их качество [1]. Для оценки качества в настоящее время используется большое количество метрик.

В работе проведено исследование метрик оценки качества восстановленных изображений с голограмм Френеля. Для синтеза голограмм и восстановления изображений использован расчёт дифракции. Для моделирования искажений, вносимых камерой, использовался гауссов шум, а спеклов – шум «соль и перец». Численное моделирование синтеза проведено с помощью программной реализации на языке Python. В работе реализовано и исследовано три типа метрик:

1) Требующие исходное изображение, с попиксельным сравнением: PSNR (пиковое отношение сигнал/шум), НСКО (нормированное среднеквадратическое отклонение) и коэффициент корреляции (КК).
2) Требующие исходное изображение, учитывающие соседние пиксели: индекс структурного сходства и его модификации (SSIM, IW-SSIM,

MS-SSIM), FSIM (сходство признаков), DSS (дискретное косинусное преобразование), GMSD (отклонение сходства величины градиента), HaarPSI (отклонение перцептивного сходства Хаара), MDSI (индекс сходства среднего отклонения) и VIFp (точность визуальной информации).

3) Не требующие исходного изображения – BRISQUE (оценка качества изображения без оригинала).

Для сравнения метрик между собой использовался метод VQEG [2]: полученный набор значений метрик аппроксимируется логарифмической функцией с 4 свободными параметрами и вычисляются коэффициенты корреляции Пирсона и Спирмена [3]. Чем выше значения коэффициентов, тем лучше «точность» и «монотонность» метрики. Из рис. 1 видно, что лучшие результаты показали КК, SSIM и его модификации.

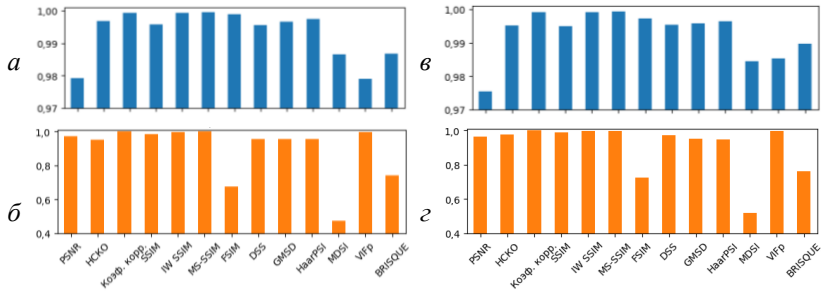


Рис. 1. Коэффициенты корреляции Пирсона (*а*, *в*) и Спирмена (*б*, *г*) для восстановленных изображений с голограмм с добавленным шумами: «соль и перец» (*а*, *б*) и гауссовым (*в*, *г*)

Полученные результаты будут использованы для разработки новой метрики оценки качества восстанавливаемых изображений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 24-19-00899.

Список литературы

1. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Kozlov A.V., et al. An Optical-Digital Method of Noise Suppression in Digital Holography // Journal of Optics. 2022. V. 24. No. 11. P. 115702.

2. Group V.Q.E., et al. Final report from the video quality experts group on the validation of objective models of video quality assessment, phase II. 2003. VQEG. 2023.

3. Al-Hameed K.A. Spearman's correlation coefficient in statistical analysis // International Journal of Nonlinear Analysis and Applications. 2022. V. 13. P. 3249-3255.

УДК 535(06)+004(06)

Т.А. ГАТАТДИНОВ, Е.Ю. ЗЛОКАЗОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С КОМПЬЮТЕРНО-СИНТЕЗИРОВАННЫХ ГОЛОГРАММ В ГОЛОГРАФИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ

Данная работа посвящена исследованию восстановления изображений с компьютерно-синтезированных голограмм в системе с голографическим волноводом. Получены результаты восстановления изображений при различных методах синтеза голограмм Фурье и Френеля, выведенных на жидкокристаллический фазовый пространственно-временной модулятор света.

T.A. GATATDINOV, E.Yu. ZLOKAZOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

STUDY OF IMAGE RESTORATION PROCESS FROM COMPUTER-GENERATED HOLOGRAMS IN A HOLOGRAPHIC WAVEGUIDE

This work is devoted to the study of image restoration from computer-generated holograms in a system with a holographic waveguide. The results of image reconstruction using various generating methods of Fourier and Fresnel holograms output to a phase liquid crystal spatial light modulator have been obtained.

В современном мире технологии дополненной реальности представляют особый интерес для изучения и практического применения. Дисплеи дополненной реальности отличаются высокой прозрачностью для внешнего света. Если синтез или восстановление изображений с голограмм основаны на свойстве полного внутреннего изображения, то такие голограммы называют волноводными [1].

Целью данной работы является экспериментальное исследование восстановления изображений в голографическом волноводе. В работе использовались компьютерно-синтезированные голограммы Фурье и Френеля, при синтезе которых использовались методы парафазного кодирования, когда макропиксель голограммы представляется собой двумя субпикселями ПВМС [2], и расположение в объектной плоскости двух исходных изображений. Для восстановления изображений использовались лазер на длине волны 561 нм, фазовый ПВМС и непосредственно сам голографический волновод (рис. 1).

При восстановлении изображений в волноводе множился зрачок. Также ввиду несогласованности периодов дифракционных решёток изображения от соседних зрачков накладывались друг на друга. На рис. 2 и 3 приведены изображения, восстановленные с голограмм Фурье и Френеля.

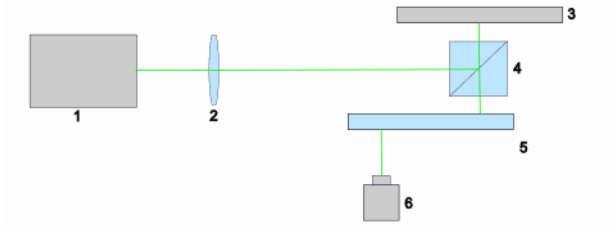


Рис. 1. Схема установки: *1* – лазер, *2* – коллиматор, *3* – ПВМС, *4* – светоделительный кубик, *5* – волновод, *6* – камера

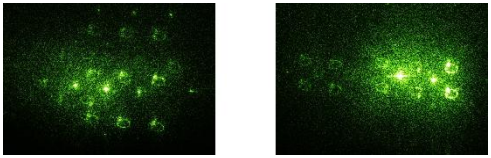


Рис. 2. Изображения, восстановленные с голограмм Фурье: метод парафазного кодирования и два объекта

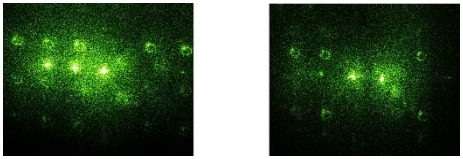


Рис. 3. Изображения, восстановленные с голограмм Френеля: метод парафазного кодирования и два объекта

Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на 2023 - 2025 годы (задание FSWU-2023-0070).

Список литературы

1. Путилин А.Н., Морозов А.В., Копенкин С.С., Дубынин С.Е., Бородин Ю.П. // Оптика и спектроскопия. 2020. Т. 128. № 11. С. 1694-1702.

2. Злоказов Е.Ю. // Диссертация на соискание учёной степени доктора физико-математических наук. М.: НИЯУ МИФИ, 2021.

УДК 535(06)+004(06)

А.А. КЕРОВ, А.В. КОЗЛОВ, П.А. ЧЕРЁМХИН, А.В. ШИФРИНА, Н.Н. ЕВТИХИЕВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

РАЗРАБОТКА АДАПТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ 3D-ФИЛЬТРАЦИИ ГОЛОГРАММ

Для улучшения качества восстановления изображений с голограмм разработан адаптивный 3D-фильтр шумов. Приведены результаты экспериментов по фильтрации голограмм.

A.A. KEROV, A.V. KOZLOV, P.A. CHEREMKHIN, A.V. SHIFRINA, N.N. EVTIKHIEV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

DEVELOPMENT OF ADAPTIVE FILTERS FOR 3D-HOLOGRAMS FILTRATION

To improve the quality of image reconstruction from holograms, an adaptive 3D noise filter has been developed. The results of experiments on hologram filtering are given.

Голография получила широкое распространение в науке и технике [1], поскольку позволяет регистрировать не только распределение амплитуды, но и фазы объекта. Одной из главных проблем в когерентной голографии является наличие спекл-шума [2]. Существует множество различных техник борьбы с ним, среди которых можно выделить оптико-цифровые, цифровые и гибридные [3].

В работе разработан новый метод подавления шумов цифровых голограмм, использующий фильтрацию сразу набора голограмм. В качестве основы фильтрующего алгоритма был применён фильтр Фроста [4], который применяется к 3D-массиву, состоящему из набора голограмм, синтезированных с добавлением различных спекл-шумов.

Основным преимуществом подобного подхода является наличие у фильтра Фроста свойства адаптивности, то есть результат работы фильтра зависит от величины отклонений в окне фильтрации. В качестве оценочных критериев были выбраны метрики нормированного среднеквадратичного отклонения (НСКО) и индекса структурного сходства (ИСС).

В результате сравнительного анализа эффективности фильтрации для восстановленного с голограммы изображения объекта, представленного на рис. 1, удалось добиться улучшения значений НСКО и ИСС на 70 и 62 % по сравнению с классическим фильтром Фроста. Использовался массив из 90 голограмм. Результат обработки изображения после применения предложенного адаптивного 3D-фильтра Фроста представлен на рис. 2.



Рис. 1. Зашумленное изображение



Рис. 2. Изображение, отфильтрованное с помощью предложенного адаптивного 3D-фильтра Фроста

Полученные результаты подтверждают высокую эффективность разработанного алгоритма фильтрации и перспективность его применения в голографии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 24-19-00899.

Список литературы

1. Pan Y., Liu J., Li X., Wang Y. A Review of dynamic holographic three-dimensional display: algorithms, devices, and systems // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2016. V. 12. No. 4. P. 1599-1610.

2. Picart P. Speckle noise in digital holographic images: genesis and reduction methods // digital holography and three-dimensional imaging. 2016. Th1A.1.

3. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Kozlov A.V., Krasnov V.V., Rodin V.G., Starikov R.S. An Optical-digital method of noise suppression in digital holography // Journal of Optics. 2022. V. 24. No. 11. P. 115702.

4. Frost V.S., Stiles J.A., Shanmugan K.S., Holtzman J.C. A Model for Radar Images and Its Application to Adaptive Digital Filtering of Multiplicative Noise // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1982. V. PAMI-4. No. 2. P. 157-166.

УДК 535(06)+004(06)

Ч. ЯНЬ, М.В. ШИШОВА
Московский государственный технический университет им. Н Э. Баумана

СИНТЕЗ ГОЛОГРАММНОГО ОПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ПРОЕКТОРА

Отражательные голограммные оптические элементы (ГОЭ) применяются как выходные компоненты оптических схем автомобильных проекторов. Такие ГОЭ могут быть нанесены на отдельные плоские экраны, размещённые на приборной панели, или совмещены с ветровым стеклом автомобиля, выполняя функции увеличения изображения и позволяя уменьшить габариты оптической системы. В работе предложена последовательность синтеза аналогового отражательного ГОЭ, в которой учитываются его фазовые характеристики для возможной компенсации аберраций, вносимых ветровым стеклом и параметры схемы записи.

ZHEYU YAN, M.V. SHISHOVA
Bauman Moscow State Technical University

SYNTHESIS OF A HOLOGRAM OPTICAL ELEMENT FOR CAR PROJECTOR

Reflective holographic optical elements (HOE) are used as output components of optical schemes of automotive projectors. Such HOEs can be applied onto separate flat screens placed on the dashboard or combined with the windscreen of the vehicle, performing as image magnifiers and allowing to reduce the dimensions of the optical system. The paper proposes a synthesis sequence of an analogue reflective HOE, which takes into account its phase characteristics for possible compensation of aberrations introduced by the windscreen and parameters of the recording beams.

На первом этапе синтеза исследуемого отражательного голограммного оптического элемента (ГОЭ) проводится расчёт габаритных параметров: фокусного расстояния, поля зрения и размера выходного зрачка [1]. Входными данными при этом являются: расстояние от ГОЭ до виртуального изображения на проекционной дистанции, расстояние от ГОЭ до глаза водителя, размер изображения, размер ГОЭ, угол наклона ГОЭ. ГОЭ функционирует как асферическое внеосевое зеркало, формируя увеличенное мнимое изображение от экрана, расположенного ближе его фокуса.

На втором этапе проводится расчёт параметров предметного и опорного пучков для выбранного варианта схемы записи: предметный пучок имеет расходящийся волновой фронт, а опорный является

коллимированным. На базе векторного описания трассировки набора лучей в предметном и опорном пучках проводится расчёт фазовой характеристики отражательного ГОЭ на плоской подложке. Векторы падающей и дифрагированной волн рассчитываются через координаты точек на дисплее (опорный) и на изображении (предметный). Выражение для фазы ГОЭ $\varphi(x,y)$ в зависимости от координат описывается следующей полиномиальной функцией

$$\varphi(x,y) = \frac{2\pi}{\lambda_r} \sum\nolimits_{i\geq 0.\, j\geq 0}^{1\leq i+j\leq N} A_{i,j} x^i y^j,$$

где λ_r – длина волны записи, N – высочайший порядок в полиноме, $A_{i,j}$ – коэффициенты, вычисляемые с помощью системы уравнений на основе трассировки векторных лучей [2].

В рамках этапа расчёта фазовой характеристики ГОЭ она может быть скорректирована при известной фазовой характеристики изогнутой подложки для случая, если требуется нанесение ГОЭ непосредственно на поверхность лобового стекла.

На третьем этапе синтеза с помощью встроенных возможностей программы OpticStudio проводится моделирование оптически изготовленной голограммы (OFH, optically fabricated hologram) для выполнения аберрационного анализа, а именно графиков астигматизма, дисторсии и анализу диаграммы пятен рассеяния, проводится оптимизация системы записи и корректировка фазовой функции ГОЭ.

На заключительном этапе в рамках теории связанных волн проводится анализ угловой и спектральной селективности полученного внеосевого ГОЭ для различных точек восстанавливающего пучка, представляющий протяжённый источник (дисплей), и различных координат зрачка на голограмме.

Список литературы

1. Wang Z., et al. // Applied Optics. 2024. V. 63 (3). P. 692–698.
2. Shu T., et.al. // Optics Letters. 2023. V. 48 (24). P. 6537-6540.

А.С. ОВЧИННИКОВ[1], А.А. КДЫРБАЕВ[1,2], В.В. КРАСНОВ[1],
Е.А. САВЧЕНКОВА[1], П.А. ЧЕРЁМХИН[1]
[1]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
[2]Каракалпакский институт сельского хозяйства и агротехнологий, Нукус, Узбекистан

МЕТОД НЕИТЕРАТИВНОГО КВАНТОВАНИЯ ГОЛОГРАММ, УЧИТЫВАЮЩИЙ ГИСТОГРАММУ ИНТЕНСИВНОСТИ

Разработаны и численно апробированы методы квантования, принцип работы которых основан на анализе гистограммы распределения уровня интенсивности пикселей. Данные методы сравнивались с итеративными и неитеративными методами и показали улучшение качества реконструкции до 59 % по метрикам оценки качества.

A.S. OVCHINNIKOV[1], A.A. KDYRBAEV[1,2], V.V. KRASNOV[1],
E.A. SAVCHENKOVA[1], P.A. CHEREMKHIN[1]
[1]National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
[2]Institute of Agriculture and Agrotechnologies of Karakalpakstan, Nukus, Uzbekistan

THE METHOD OF NONITERATIVE QUANTIZATION OF HOLOGRAMS, CONSIDERING THE INTENSITY HISTOGRAM

Quantization methods were developed and numerically tested. They are based on the analysis of histogram of pixel brightness level distribution,. These methods were compared with iterative and non-iterative methods and demonstrated an improvement of reconstruction quality up to 59 %.

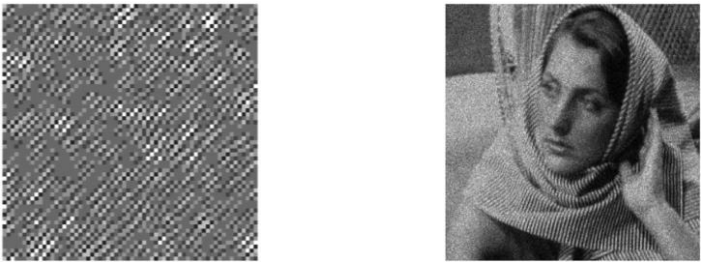
Компьютерно-синтезированные и цифровые голограммы требуют значительных ресурсов для обработки, хранения и восстановления данных [1]. Квантование позволяет сократить объём информации и уменьшить сложность обработки [2]. Этот процесс основан на снижении разрядности изображения через уменьшение числа его градаций.

Разработаны неитеративные скалярные методы квантования голограмм [3]. Принцип их работы заключается в анализе гистограммы распределения уровня интенсивности пикселей. Основные шаги алгоритма можно представить в следующем виде:

- Поиск пика гистограммы.
- Сдвиг пика гистограммы с помощью коэффициента сдвига.
- Разбиение гистограммы на неравные интервалы.

- Поиск значений интенсивности на границе интервалов гистограммы.
- Усреднение значений пикселей в полученных интервалах.
- Приравнивание значений интенсивности пикселей к среднему значению соответствующего интервала.

Дополнительно может быть применено логарифмическое компандирование, лучше учитывающее неравномерность гистограммы интенсивности. Примеры квантованной голограммы на 6 градаций и восстановленного с неё изображения показаны на рис. 1.



а *б*

Рис. 1. Фрагмент квантованной голограммы (*а*)
и реконструированное с неё изображение объекта (б)

Голограммы были квантованы на число градаций от 2 (1 бит) до 256 (8 бит). Получено, что качество восстановленных изображений с голограмм, квантованных предложенными методами, оказалось выше на 59% по сравнению с неитеративными методами и на 10 % выше по сравнению с итеративными методами. Наиболее значительное улучшение качества получено для наиболее важного случая - малого количества градаций голограммы. При этом время квантования предложенными методами соответствует простейшим неитеративным, но в 10 - 1000 раз меньше, чем у итеративных подходов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 22-79-10340.

Список литературы

1. Jackin B.J.; Watanabe S., et al. // Appl. Opt. 2018, V. 57. P. 3134-3145.
2. Kurbatova E.A., Cheremkhin P.A., et al. // Phys. Procedia 2015, V. 73. P. 328-332.
3. Savchenkova E.A.; Ovchinnikov A.S., et al. // Optik. 2024. V. 311. P. 171933.

УДК 535(06)+004(06)

А.С. СВИСТУНОВ, А.В. КОЗЛОВ, П.А. ЧЕРЁМХИН,
Н.Н. ЕВТИХИЕВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ОСОБЕННОСТИ ЧИСЛЕННОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ, ЗАПИСАННЫХ ПРИ РАЗЛИЧНОМ УРОВНЕ ОСВЕЩЁННОСТИ

Приведены результаты численных экспериментов по восстановлению изображений с цифровых голограмм, записанных в условиях экстремально низкой освещённости и в условиях, близких к режиму насыщения сенсора. Рассчитано качество оценки восстановленных изображений рот различным метрикам и определены их зависимости от уровня освещённости.

A.S. SVISTUNOV, A.V. KOZLOV, P.A. CHEREMKHIN,
N.N. EVTIKHIEV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

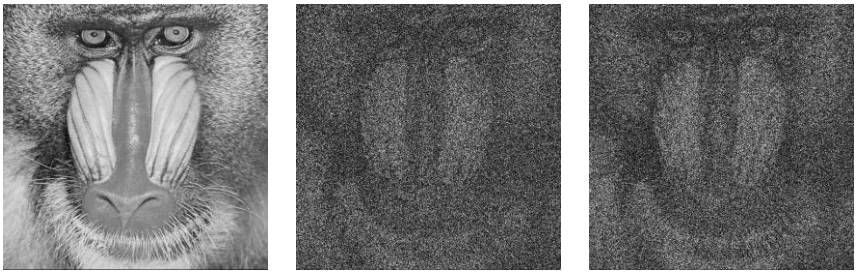
CHARACTERISTICS OF NUMERICAL RECONSTRUCTION OF IMAGES FROM DIGITAL HOLOGRAMS RECORDED UNDER DIFFERENT ILLUMINATION CONDITIONS

The results of numerical experiments on image reconstruction digital holograms recorded under extremely low illumination conditions and under conditions near the sensor saturation mode are presented. Various metrics for evaluating the quality of the reconstructed images are calculated and their dependences on the illumination level are determined.

Использование широкого диапазона величин экспозиции существенно расширяет условия регистрации цифровых голограмм, набор типов голографируемых объектов и возможности динамической съёмки [1]. Сверхбыстрая съёмка приводит к уменьшению времени экспозиции и большому числу пикселей с нулевым уровнем интенсивности [2]. Голографирование же ярких объектов обеспечивает насыщение сигнала в большинстве пикселей, которые также становятся неинформативными. В связи с этим необходимо оценить зависимости качества восстановления информации с цифровых голограмм при различных уровнях освещённости.

Проведено моделирование регистрации цифровых голограмм в режиме экстремально низкой освещённости и режима, близкого к насыщению. В модели учитывались различные шумы цифровых камер, формировался набор данных с заданным числом неинформативных пикселей.

На рис. 1 приведены примеры изображений, реконструированных с цифровых голограмм Френеля при 40 % пикселей в насыщении и 95 % нулевых пикселей. Видно, что для случая экстремально низкой освещённости допустимо значительно большее число неинформативных пикселей, так как даже при 95 % пикселей с нулевой интенсивностью восстановленное изображение содержит меньше шумов, чем в случае 40 % пикселей в насыщении.



а *б* *в*

Рис. 1. Оригинальное изображение (*а*) и изображения, восстановленные с цифровых голограмм Френеля с 40% пикселей в насыщении (*б*) и 95 % пикселей с нулевой интенсивностью (*в*)

Полученные результаты представляют интерес с точки зрения оценки возможностей метода прямого расчёта дифракции по восстановлению информации с цифровых голограмм, зарегистрированных в различных условиях освещённости. Также данные результаты могут использоваться в дальнейшем для формирования наборов данных для обучения нейронных сетей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 24-19-00899.

Список литературы

1. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., et al. // Optics and Lasers in Engineering. 2021. V. 139. P. 106461.

2. Ying G., Ze C., et al. // Optics & Laser Technology. 2025. V. 181 (B). P. 111876.

УДК 535(06)+004(06)

М.К. ДРОЗДОВ, Д.А. РЫМОВ, А.С. СВИСТУНОВ,
А.В. ШИФРИНА, Р.С. СТАРИКОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ВОССТАНОВЛЕНИЕ БИНАРНЫХ ЦИФРОВЫХ КОНТЕЙНЕРОВ ДАННЫХ С ЦИФРОВЫХ И КОМПЬЮТЕРНЫХ ГОЛОГРАММ НА ОСНОВЕ СВЁРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Для восстановления изображений QR-кодов из голограмм Френеля предложен метод реконструкции на основе модифицированной свёрточной нейронной сети U-Net. Проведено обучение сети на большом количестве сгенерированных данных, а также проверена численная оценка качества восстановления сети.

M.K. DROZDOV, D.A. RYMOV, A.S. SVISTUNOV, A.V. SHIFRINA,
R.S. STARIKOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

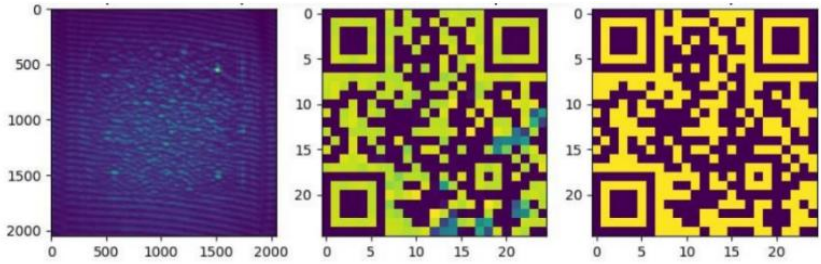
BINARY DIGITAL RECOVERY DATA CONTAINERS FROM DIGITAL AND COMPUTER HOLOGRAMS BASED ON A CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK

To restore QR-codes from Fresnel holograms, a reconstruction method based on the modified convolutional neural network U-Net is proposed. The network was trained on a large amount of generated data, and a numerical assessment of the quality of network recovery was carried out.

Применение нейронных сетей для реконструкции изображений с голограмм позволяет избавиться от проблем, свойственных классическим методам [1], например, восстановить изображение без нежелательных дифракционных порядков, что позволяет отказаться от дополнительной фильтрации изображения [2]. Восстановление 3D-сцен, состоящих из бинарных страниц данных, с голограмм потенциально может дать существенное увеличение количества регистрируемой информации при одном считывании изображения.

В работе проведено исследование возможности восстановления широко используемых бинарных цифровых контейнеров данных – QR-кодов из голограмм Френеля при помощи модифицированной свёрточно-развёрточной архитектуры нейронной сети U-Net. Метод апробирован в

численном моделировании и на оптически зарегистрированных данных. На рис. 1 представлен результат восстановления изображения QR-кода из цифровой голограммы. Объекты выводились на фазовый пространственно-временной модулятор света HoloEye GAEA-2, а камера регистрировала цифровую голограмму.



а *б* *в*

Рис. 1. Зарегистрированная цифровая голограмма (*а*), восстановленное изображение предложенным методом (*б*) и оригинал изображения объекта (*в*)

Видно, что восстановленное изображение объекта практически идентично оригиналу. Количество ошибочных пикселей составляет $(1{,}2 \pm 0{,}2)$ %. Этого достаточно для успешного сканирования QR-кода в том числе стандартными средствами мобильных устройств. При восстановлении изображения прямым расчетом интеграла Френеля количество ошибочных пикселей может быть существенно выше, особенно в случае осевой схемы записи голограмм.

Таким образом, впервые продемонстрировано успешное нейросетевое восстановление изображений существенно неоднородных данных с голограмм. Это говорит о потенциальной возможности перехода к разработке и реализации новых методов упаковки информации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 23-12-00336.

Список литературы

1. Рымов Д.А, Черемхин П.А, Стариков Р.С Нейросетевая реконструкция сцен с цифровых голограмм на основе извлечения амплитуды и фазы // Оптический журнал. 2022. № 9 (89). С. 9-11.

2. Nagahama Y. Phase retrieval using hologram transformation with U-Net in digital holography // Optics Continuum. 2022. № 7 (1). С. 1506.

УДК 535(06)+004(06)

С.А. КИРИЙ, А.С. СВИСТУНОВ, Д.А. РЫМОВ,
Р.С. СТАРИКОВ, П.А. ЧЕРЁМХИН
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ЦИФРОВЫХ И КОМПЬЮТЕРНЫХ ГОЛОГРАММ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕРАТИВНО-СОСТЯЗАТЕЛЬНОЙ НЕЙРОСЕТИ

Для восстановления изображений с цифровых и компьютерных голограмм 3D-сцен реализован и предложен метод на основе генеративно-состязательной нейросети, включающей в себя сеть-генератор, который производит восстановление изображений с голограмм, и сеть-дискриминатор, оценивающий качество полученного изображения. Проведена оценка качества восстановленных изображений.

S.A. KIRIY, A.S. SVUSTUNOV, D.A. RYMOV,
R.S. STARIKOV, P.A. CHEREMKHIN
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

DIGITAL AND COMPUTER-GENERATED HOLOGRAM RECONSTRUCTION VIA GENERATIVE ADVERSIAL NEURAL NETWORK

A generative-adversarial neural network model, consisting of a generator network, which generates images, and a discriminator network, which assesses their quality, was proposed and trained to reconstruct images from in-line holograms. Quality of reconstructed images was estimated.

Применение нейронных сетей является чрезвычайно перспективным направлением для задач фотоники, в том числе голографии [1]. Например, такой подход может позволить избежать появления нежелательных порядков дифракции при восстановлении изображений [2] в силу обучения модели на исходных изображениях объектов, что позволяет выделить из голограммы только требуемую информацию без использования дополнительной фильтрации.

В работе проведено исследование возможности восстановления изображений с голограмм с применением генеративно-состязательной нейросети (ГСН), состоящей из сети-генератора с архитектурой U-Net [3] и сети-дискриминатора. ГСН представляет из себя использование одновременно двух нейронных сетей, одна из которых производит

восстановление изображений с голограмм (сеть-генератор), а вторая оценивает качество полученных результатов (сеть-дискриминатор) [4]. Таким образом происходит взаимообучение двух нейросетей, что может способствовать более тщательному обучению сети-генератора и, как следствие, более высокому качеству восстановлению изображений. На рис. 1 представлены примеры оригинальных изображений и восстановленных при помощи обученной модели соответственно с компьютерных голограмм (*а*, *б*) и экспериментально зарегистрированных (*в*, *г*) цифровых голограмм.



а *б* *в* *г*

Рис. 1. Примеры оригиналов объектов (*а*, *в*) и восстановленных изображений с применением генеративно-состязательной нейросети (*б*, *г*)

Предложенный метод показывает высокий результат реконструкции изображений с цифровых и компьютерных осевых и внеосевых голограмм объёмных сцен. Проведено сравнение результатов с методом численного расчёта распространения излучения на основе скалярной теории дифракции и с применением популярной нейронной сети U-Net, уступившим по количественным метрикам предложенному метода.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 22-79-10340.

Список литературы

1. Situ G. Deep holography // Light: Advanced Manufacturing. 2022. V. 3. P. 278-300.

2. Kiriy S.A., Rymov D.A., Svistunov A.S., Starikov R.S., Shifrina A.V., Cheremkhin P.A. Generative adversarial neural network for 3D-hologram reconstruction // Laser Physics Letters. 2024. V. 21. P. 045201.

3. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation // MICCAI. 2015. V. 9351. P. 234-241.

4. Khan A., Zhijiang Z., Yu Y., et al. GAN-Holo: generative adversarial networks-based generated holography using deep learning // Complexity. 2021. V. 2021. P. 6662161.

УДК 535(06)+004(06)

А.А. ВОЛКОВ, Е.Ю. ЗЛОКАЗОВ, Д.В. ПАВЛЕНКО,
Е.К. ПЕТРОВА, Т.Ш. ФАЗЛИЕВ, Р.С. СТАРИКОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ, ФОРМИРУЮЩИХ МАКСИМУМ ВЗАИМНОКОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ ЗАДАННОЙ ФОРМЫ В 4F-СХЕМЕ

Приведены предварительные результаты по экспериментальной реализации голографических фильтров с минимизацией средней энергии корреляции со сглаживающими функциями.

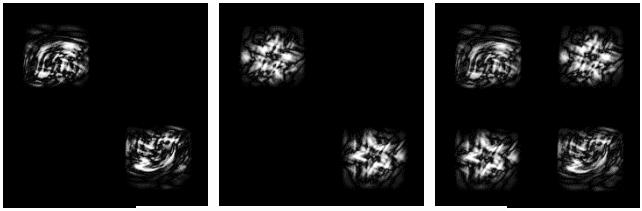
A.A. VOLKOV, E.Yu. ZLOKAZOV, D.V. PAVLENKO,
E.K. PETROVA, T.Sh. FAZLIEV, R.S. STARIKOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

EXPERIMENTAL IMPLEMENTATION OF HOLOGRAPHIC FILTERS WITH A FORMING THE FORM OF THE CROSS-CORRELATION FUNCTION FOR THE 4F-CORRELATOR

Preliminary results on the experimental implementation of holographic realization minimal average correlation energy filters with smoothing functions are presented.

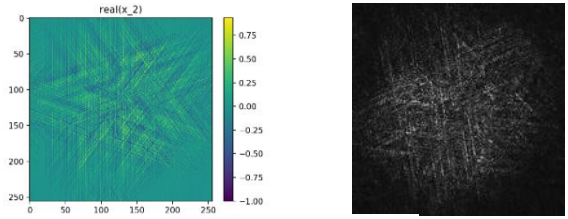
Корреляционный метод распознавания привлекателен благодаря возможностям его оперативной реализации, как на базе электронных вычислительных средств, так и с применением оптико-цифровых систем, обеспечивающих в настоящее время возможности обработки изображений с разрешением в единицы Мпикс в темпе десятков кГц. Особый интерес представляет использование инвариантных фильтров, которые позволяют сохранить возможность распознавания при искажениях истинного объекта на входном изображении системы [1]. Целью работы является экспериментальное исследование возможностей реализации в когерентном 4f-коррелятоpе фильтров с со сглаживающими функциями, обеспечивающими заданную форму максимума взаимокорреляционной функции. фильтры были. Были синтезированы соответствующие инвариантные голографические фильтры – голограммы Фурье, восстанавливающие в первом дифракционном порядке пространственное

распределение с амплитудой и фазой инвариантных фильтров, также были синтезированы мультиплексные голограммы, содержащие два инвариантных фильтра на разных пространственных несущих. Примеры смоделированных выходных сигналов 4f-коррелятора с такими голографическими фильтрами представлены на рис. 1. Проведены эксперименты, в ходе которых исследуемые голографические фильтры выводились с помощью микрозеркального пространственного временного модулятора света, пример приведён на рис. 2.



а *б* *в*

Рис. 1. Выходные сигналы 4f-коррелятора (моделирование, изображение в нулевом порядке удалено, области корреляции внизу). фильтр с заданной формой взаимокорреляционной функции в виде птицы (*а*), звезды (*б*), мультиплексная голограмма с фильтрами (*в*), во всех случаях на входе истинный объект



а *б*

Рис. 2. Реальная часть фильтра с заданной формой в виде звезды (*а*) и распределение в первом порядке дифракции (*б*) соответствующего голографического фильтра, реализованного с помощью микрозеркального ПВМС

Работа выполнена при поддержке РНФ, грант № 23-12-00336.

Список литературы

1. Vijaya Kumar B.V.K., Mahalanobis A., Juday R.D. Correlation pattern recognition. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2005.

УДК 535(06)+004(06)

А.Ю. ОСИЧЕВА, А.Ю. ШАХМАТОВ, Д.В. СЫЧ[1]
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный
[1]Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ОДНОПИКСЕЛЬНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И КЛАССИФИКАЦИИ РУКОПИСНЫХ ЦИФР

Приведены результаты экспериментов по применению алгоритмов машинного обучения для решения задач визуализации и распознавания рукописных цифр в методе однопиксельной визуализации. Получены изображения рукописных цифр с разрешением 64 × 64. Точность классификации, продемонстрированная экспериментально, составила 0,88.

A.Yu. OSICHEVA, A.Yu. SHAKHMATOV, D.V. SYCH[1]
Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny
[1]Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

COMPUTATIONAL SINGLE PIXEL IMAGING AND CLASSIFICATION OF HANDWRITTEN DIGITS VIA MACHINE LEARNING METHODS

The results of experiments on the use of machine learning algorithms for visualization and classification of handwritten digits in the single-pixel imaging approach are presented. Images of handwritten digits with a resolution of 64 × 64 were obtained. The accuracy of classification was 0,88 on the experiment.

Метод однопиксельной визуализации [1 -3] позволяет получать информацию о пространственной структуре объектов с использованием одного фотодетектора без пространственного разрешения и последовательности световых паттернов. Данный метод обладает значительными преимуществами перед традиционным подходом с использованием матричных детекторов в некоторых нестандартных случаях визуализации, например, в спектральных диапазонах, отличных от видимого, и в режиме одиночных фотонов. Для решения различных прикладных задач в однопиксельной визуализации может применяться большое количество алгоритмов [4], в том числе методы машинного обучения, позволяющие решать, в частности, задачи визуализации и классификации объектов.

Целью работы является экспериментальная реализация алгоритмов машинного обучения в методе однопиксельной визуализации для получения изображений и распознавания рукописных цифр. Для постобработки и последующей визуализации использовалась предобученная на датасете imagenet1k нейросеть с архитектурой [5], представленной на рис. 1. При обучении на входное изображение действует линейное преобразование, соответствующее паттернам, реализуемым в установке. Полученный сигнал нормализуется и обрабатывается последовательными полносвязными и свёрточными слоями нейросети, восстанавливая изображение. После обучения сигнал, который получает первый слой нейросети, заменяется на сигнал, измеренный непосредственно на установке. Примеры результатов восстановления изображений приведены на рис. 2. Аналогичным образом устроена нейросеть для классификации рукописных цифр, однако свёрточные слои заменены на дополнительные полносвязные. Точность классификации, продемонстрированная экспериментально, составляет 0,88.

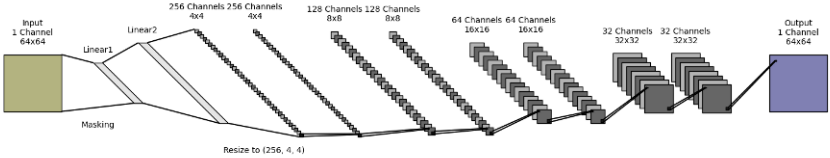


Рис. 1. Архитектура нейронной сети

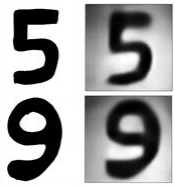


Рис. 2. Визуализация рукописных цифр: объекты (слева)
и результаты визуализации (справа)

Список литературы

1. Golay M.J.E. // J. Opt. Soc. Am. 1949. V. 39 (6). P. 437-444.
2. Duarte M.F., et al. // IEEE Signal Processing Magazine. 2008. V. 25 (2). P. 83-91.
3. Osicheva A., Sych D. // Sensors. 2024. V. 24. P. 4689.
4. Gibson G.M., Johnson S.D., Padgett M.J. // Optics Express. 2020. V. 28 (19). P. 28190-28208.
5. Higham C. F., Murray-Smith R., Padgett M. J., Edgar M.P. // Sci. Rep. 2018. V. 8(1). P. 2369.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. КОЗЛОВ, А.С. ОВЧИННИКОВ, П.А. ЧЕРЁМХИН,
В.Г. РОДИН
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

МОДИФИЦИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ШУМОВ ЦИФРОВЫХ КАМЕР, ИСХОДЯ ИЗ РЕГИСТРАЦИИ ОДНОГО СНИМКА

Современные методы оценки шумов из одного изображения анализируют шумы самого снимка, а не шумовые характеристики регистрирующей камеры. В работе разработаны модификации методов, позволяющие оценить величину полного шума камеры в зависимости от уровня сигнала.

A.V. KOZLOV, A.S. OVCHINNIKOV, P.A. CHEREMKHIN,
V.G. RODIN
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

MODIFIED METHODS FOR ESTIMATING DIGITAL CAMERA NOISE BASED ON SINGLE-SHOT

Modern methods of noise estimation from a single image analyze the image noise image itself, and not the camera noise characteristics. Therefore, modifications of the methods have been developed that allow estimating the camera total noise vs the signal level.

Цифровые камеры на сегодняшний день широко применяются в решении задач различных областей, включая медицину, обеспечение безопасности, контроль качества, метрология и др. Для удешевления оптико-цифровых систем регистрации, повышения их динамического диапазона и улучшения качества полученных изображений часто требуется знать параметры камер, включая величины их шума. Чтобы оценить шумы камер, разработано много методов [1]. Наиболее перспективными являются методы оценки по одному изображению, однако они по сути анализируют шумы самого снимка, а не камеры.

В работе разработано 4 модифицированных метода для получения зависимости полного шума от уровня сигнала, используя всего одно изображение. Основой являлись методы Х. Лю [2], С.М. Янга [3], О. Лалиганта [4] и А. Фоя [5]. Предложенные модификации включают в себя сегментацию, фильтрацию и приведение шумовых параметров к стандартному представлению.

Пример неоднородного снимка, снятого камерой Retiga R6, и полученных зависимостей шума от сигнала показаны на рис. 1. Также показана зависимость, полученная для стандартной времязатратной техники EMVA 1288 [6]. Видно, что результаты, показанные методами (рис. 2), находятся в согласии с зависимостью для стандарта.

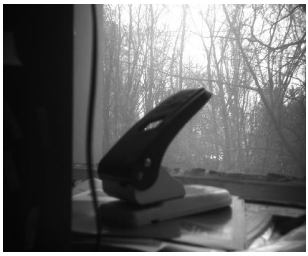


Рис. 1. Пример неоднородного снимка камеры Retiga R6

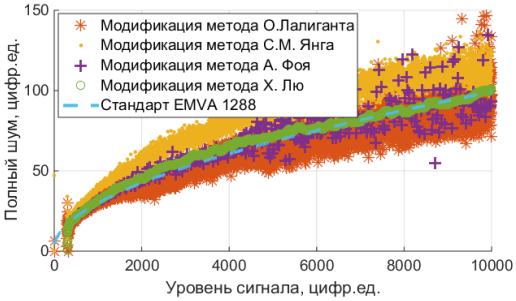


Рис. 2. Зависимости полного шума от сигнала, полученные различными методами

В дальнейшем планируется разработка методов, извлекающих из полученных зависимостей отдельные составляющие шума камеры: светового временного, светового пространственного и темнового шума.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 24-19-00898.

Список литературы

1. Kozlov A.V., Rodin V.G., Starikov R.S., Evtikhiev N.N., Cheremkhin P.A. A family of methods based on automatic segmentation for estimating digital camera noise: A review // IEEE Sensors Journal. 2024. V. 24, No. 11. P. 17353-17365.

2. Liu X., Tanaka M., Okutomi M. Practical signal-dependent noise parameter estimation from a single noisy image // IEEE Transactions on Image Processing. 2014. V. 23. P. 4361-4371.

3. Yang S.M., Tai S.C. Fast and reliable image-noise estimation using a hybrid approach // journal of electronic imaging. 2010. V. 19. P. 033007.

4. Laligant O., Truchetet F., Fauvet E. Noise estimation from digital step-model signal // ieee transactions on image processing. 2013. V. 22. P. 5158-5167.

5. Foi A., Trimeche M., Katkovnik V., Egiazarian K. Practical Poissonian-gaussian noise modeling and fitting for single-image raw-data // IEEE Transactions on Image Processing. 2008. V. 17. P. 1737-1754.

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

-А-

Абеуов Д.Р. 299
Абраменко Е.В. 409
Абрамов А.Н. 277
Абрамов А.С. 573
Авакянц Л.П. 91
Авдеев П.Ю. 383
Аверин С.В. 225, 527, 629
Авласевич Н.Т. 675, 683
Автандилов К.Ш. 473
Агринский М.В.599
Агрузов П.М. 165
Аймуханов А.К. 299, 307
Айт А.О. 345
Акрестина А.С. 519
Алейник И.А. 381
Алексеенко И.В. 263
Алексеенко Н.А. 403
Алексеенко П.О. 375
Алехин М.С. 433
Алешина П.А. 429
Аллахвердиев К.Р. 55
Алтухов Ю.А. 497, 499
Алферьев А.Л. 383
Алымкулов С.А. 673
Аманова М.А. 541
Амброзевич С.А. 319, 361
Андреева В.А. 441
Андрианов Е.С. 157, 595
Аникеева В.Е. 63
Анисимов Р.И. 51, 529
Антропов А.А. 175
Анциферов С.А. 607
Арсенин А.В. 35, 81, 101, 355
Асадчиков В.Е. 413
Асташкевич С.А. 377, 379, 393, 397
Афанасьев М.С. 217
Афанасьева О.Л. 639
Ахатова Ж.Ж. 299
Ахматханов А.Р. 41
Ашихмин Д.И. 431

-Б-

Бабаев А.А. 353
Бабин М.Д. 649
Багдасаров В.Х. 59, 179
Багров А.Р. 129, 587
Бажутова И.В. 443
Бакланова К.Д. 45
Бакунов М.И. 57
Баландин Е.К. 705
Баленко Н.В. 501
Баранов Д.Г. 157
Баранов М.А. 267
Баринова О.П. 329
Барулина Е.Ю. 277
Батуев И.О. 453
Бахус А.В. 461
Башкиров Е.К. 129
Безверхняя Д.М. 319, 361
Бездидько С.Н. 621
Безус Е.А. 243
Безус Ю.А. 365
Бейсембеков М.К. 307
Белашов А.В. 647, 687, 691
Белашов М.В. 647, 691
Белов А.С. 561
Белов К.Н. 343
Белов М.П. 69
Белоусова А.С. 629
Бельская Д.Е. 523
Беляева А.А. 441
Беляева Т.Н. 687, 691
Бенгальский Д.М. 463, 491
Бердников А.С. 343
Бердникова А.Д. 309
Березовская А.А. 289
Биленко И.А. 99, 117, 121, 189
Бирюкова И.В. 513, 525
Благов А.Е. 31
Блоцкая Д.С. 541
Бобрева Л.А. 525
Бобров А.И. 561
Богатова Е.А. 441

Богачков И.В. 559, 563
Бойко А.А. 41
Боков П.М. 461
Болдырев Н.Ю. 63
Болтенко А.В. 335
Борейшо А.С. 237
Боритко С.В. 193
Бородин Ю.П. 257
Бородина Л.Н. 73, 267, 387
Бражников М.К. 457, 621
Бреусова А.С. 233
Брецько М.В. 653, 657
Брюквина Д.А. 121
Бугасов И.А. 669
Будылин Г.С. 441
Буйко С.А. 607
Букатин А.С. 73
Булатов С.С. 529
Булдакова А.В. 139
Бурдуленко О.В. 359
Бурмистров Е.Р. 91
Бурнашов А.А. 285
Бурцев А.А. 141
Буряков А.М. 383
Бусурин В.И. 627
Бусыгина И.А. 411
Бутов О.В. 171
Буть А.И. 663
Бухаров Д.Н. 281
Бучинская И.И. 505
Быков А.А. 313
Быковский А.Ю. 253
Бычков С.Б. 201, 475, 479, 483

-В-

Варламов А.В. 165
Вартанян Т.А. 73, 387
Васецкий С.О. 627
Васильев С.В. 699
Васильева О.Ф. 373
Василюк Г.Т. 345
Васютинский О.С. 647, 687, 691
Вашукевич Е.А. 115, 467
Векшин М.М. 577
Вениаминов А.В. 267, 387
Виноградов И.А. 393, 397
Витухновский А.Г. 191
Владимиров А.П. 137
Власов М.Ю. 433
Вовченко Е.Д. 411
Войтешонок Ю.В. 435
Войцеховский А.В. 275
Волков А.А. 703, 721
Волков В.Г. 615, 619
Волков В.С. 35, 81, 101
Волков П.В. 561
Волкова В.В. 371, 375
Волова Л.Т. 427, 437, 443
Волынец Н.И. 319, 361
Волынкин В.М. 599
Волынский М.А. 271
Воробьев А.К. 189
Воронко А.И. 225
Воропай Е.С. 403. 405, 415, 417
Втюрин А.Н. 513
Вьюнышев А.М. 231

-Г-

Гаврилова Д.А. 341
Гаврилова М.А. 341
Гавриловец Д.А. 375
Гаврушко В.В. 511
Гадиров Р.М. 331
Газизов А.Р. 83, 133
Гайдаш А.А. 203, 487
Галактионов И.В. 481, 485, 493, 635, 661
Галюк К.А. 59, 179
Гармаева Э.В. 571
Гарматина А.А. 413
Гататдинов Т.А. 707
Гафуров Э.М. 173
Гафурова Л.В. 59, 179
Гейнц Ю.Э. 351
Герасимова В.В. 509
Гец Д.С. 305
Гилев Д.Г. 547
Гиндин П.Д. 615, 619
Гладкий В.Ю. 607
Гладких А.Ю. 69
Гладских А.А. 297
Гладских И.А. 297
Гладуш М.Г. 67
Глебович Т.С. 345
Головань Л.А. 143
Головина Т.Г. 539
Голодухина А.Н. 99
Голубева Т.Ю. 115, 467
Горбач Д.В. 47

Горбунков М.В. 187
Гордеева А.И. 53
Горелик А.М. 345
Горин Д.А. 419
Горлов Н.И. 571
Горн Д.И. 275
Горяев М.А. 333
Гребенев В.В. 141
Гресько В.Р. 293
Григорьева И.Г. 411
Гришачев В.В. 205
Громов И.В. 423
Губин М.Ю. 35, 95, 101
Гусев Н.С. 383
Гусельников М.С. 149

-Д-

Давлетшин Н.Н. 231
Давыдовская В.В. 531
Дададжанов Д.Р. 73, 79, 297, 387
Даденков И.Г. 43
Дайбаге Д.С. 319, 361
Данилин А.Н. 117
Данилкин М.И. 319
Данилов В.А. 591
Даниэлс Г.К. 461
Даринский А.Н. 119
Дворецкий С.А. 275
Демин В.А. 49, 557
Денисов Д.Г. 603, 695
Деримедведь Д.К. 425
Джаманкызов Н.К. 673, 685
Джгамадзе Г.Т. 237
Дзядух С.М. 275
Дик Т.А. 183
Дирко В.В. 283
Дмитриев Н.Ю. 121
Долганов В.К. 45, 501
Долганов П.В. 45, 501
Долгирев В.О. 497, 499
Долгополов А.Д. 293
Домарев С.Н. 335
Досколович Л.Л. 243
Досмаганбет Е.С. 299
Дроздов М.К. 717
Дубиков А.В. 523
Дубынин С.Е. 257
Душанин А.П. 117
Дылов Д.В. 241
Дю В.Г. 519

-Е-

Евстропьев С.К. 341
Евтихиев Н.Н. 239, 441, 705, 709, 715
Егоров В.К. 217
Егоров Е.В. 217
Егоров Ю.А. 649
Егорова О.Н. 177
Ежова К.В. 227
Еланская К.Г. 357
Елисеев Н.Н. 141
Емельянов В.А. 207
Епифанов Е.О. 419, 425
Еремчев И.Ю. 317
Ермаков В.С. 187
Ермалицкая К.Ф. 405, 415, 417
Ермолаев Г.А. 157
Еровенко З.А. 219
Ерохин К.Ю. 465
Ершков М.Н. 185
Ефремов В.Д. 175

-Ж-

Жеглов М.А. 627
Житов В.А. 527
Жихорева А.А. 647, 687, 691
Жуков Л.О. 167
Жукова М.О. 149
Жуланова П.В. 423
Журавлев А.А. 565
Журавлев В.А. 49
Журавлёв Д.А. 313

-З-

Забелина Е.В. 539
Заботнов С.В. 143
Завгородний Д.С. 623
Завидовский И.А. 81, 355
Загорулько К.А. 395
Зажогин А.П. 403, 405, 409, 415, 417, 421
Зайцев С.И. 247
Замятин А.А. 391
Захаров Л.Ю. 527
Захаров М.А. 511
Захарчук И.А. 319, 361
Зейниденов А.К. 299, 307
Зеленков Л.Е. 287, 305, 359
Зинин П.В. 313

Злоказов Е.Ю. 195, 269, 567, 703, 707, 721
Зотова А.В. 443
Зябловский А.А. 595

-И-

Иванов А.В. 61, 87
Иванов С.И. 625
Иванов С.С. 427
Иванова Т.В. 623
Ивасенко В.А. 529
Ивахник В.В. 587
Избасарова Э.А. 83, 133
Ильин С.П. 287
Ильина В.В. 613
Ильинский А.В. 309
Ильичев И.В. 165
Ильясов Б.Р. 299
Ионин В.В. 141
Исаева Л.Н. 469
Исмагилов А.О. 149, 203, 235, 487
Исманов Ю.Х. 673, 681, 685

-К-

Каасик В.П. 401
Каваленя А.А. 569
Кадетова А.В. 517, 521
Кадриев О.Р. 511
Казаков И.А. 207
Казанцев И.С. 295
Казанцев С.Ю. 461, 489
Казин Н.А. 331
Казьмин М.И. 195, 567
Кайтуков Ч.Б. 247
Калачёв Ю.Л. 399
Калиничев А.А. 487
Калюнин А.Д. 459
Калягина Н.А. 449
Камынин В.А. 173
Капитанова О.О. 213
Каплунов И.А. 503
Карамышева С.П. 445
Каралтин Е.А. 383
Карманов А.А. 311
Карпач П.В. 345
Карпов В.В. 615, 619
Касимова В.М. 539
Кастро Р.А. 309
Катеев И.Ю. 125
Кашапова Д.И. 659
Кашкаров П.К. 143
Каюмзода А.К. 533
Каюмов К.А. 443
Кдырбаев А.А. 713
Керов А.А. 709
Киреев В.Б. 343
Кирий С.А. 719
Киселев А.В. 141
Кислов Д.А. 85
Кистенева М.Г. 519
Кленова Н.А. 433
Клепиков Д.А. 459
Клименко Д.И. 353
Климов А.А. 383
Климов В.А. 309
Князева М.А. 317
Князькин Д.Д. 329
Кобцев С.М. 423
Ковалев Е.Е. 207
Коваленко А.Ф. 407
Коваленко М.Н. 403
Ковальчук М.В. 31
Кожевникова А.М. 263
Козиев К.С. 537
Козлов А.А. 49
Козлов А.В. 239, 395, 705, 709, 715, 725
Козлов С.А. 149
Козлова Н.С. 539
Козловский К.И. 411
Козубов А.В. 203, 487
Козюхин С.А. 143
Колинько Т.И. 197
Колмаков А.А. 51, 529
Колобкова Е.В. 349
Колчин А.В. 143
Колымагин Д.А. 191
Командин Г.А. 505
Комов Э.В. 51, 519, 529
Комоцкий В.А. 671
Кондратов А.П. 611
Конеев Р.В. 363
Кононов А.А. 309
Кононов Д.В. 73, 79, 387
Константинова А.Ф. 539
Копёнкин С.С. 257
Кореньков И.Н. 529
Корибут А.В. 183
Корнеева А.А. 313

Корнилин Д.А. 557
Корнилицын А.Р. 53
Корнилова Е.С. 687, 691
Коровай О.В. 585
Королев С.Б. 123
Королева Т.В. 75
Короленко П.В. 255
Королёв И.С. 201, 475, 479
Король Т.К. 651, 655
Королькова О.В. 643
Коршунов А.А. 413, 431
Кособоков М.С. 41
Косолапова К.Д. 301
Костин П.А. 325, 327
Костромыкина В.В. 451
Котликов Е.Н. 609
Котов В.М. 225, 527, 629
Котов Т.А. 631
Котова А.Д. 375
Котова С.П. 159, 645, 659
Кочаков А.В. 73, 79
Кочуев Д.А. 35
Кравцов В.А. 277
Красников И.В. 249
Краснов В.В. 713
Красноперов Н.Н. 405, 415, 417
Кретушев А.В. 265
Кривецкая А.А. 153
Кришток В.В. 49, 543, 547
Кропотов Г.И. 503, 509
Круглов С.К. 633
Кручинин Н.Ю. 303
Крылов А.С. 513
Кубанов Р.Т. 255
Кудрявцев А.А. 379
Кудрявцев А.В. 605
Кудряшов С.И. 155
Кузенко Д.В. 515
Кузнецов А.В. 579
Кузнецов А.С. 639
Кузнецов П.И. 145
Кузнецов С.А. 615, 619
Кузнецов С.В. 505
Кузнецова А.В. 641
Кузьменко Н.К. 349
Кузьмин В.Г. 241
Кузьмин Н.Н. 535
Кузьмицкий П.М. 493
Кукенов О.И. 285
Кукушкин Д.Е. 227
Кулагина М.А. 367
Кулак Г.В. 541, 677
Кулик Д.Д. 221
Куликов А.Г. 31
Кулиш О.А. 577
Кундикова Н.Д. 343
Кустов Д.М. 153
Кучеренко М.Г. 291, 303

-Л-

Лавров А.П. 625
Лавровская Н.П. 609
Лантух Ю.Д. 337
Лапаева С.Н. 653, 657
Лапин В.А. 573
Лаппо-Данилевская А.К. 235
Ласкавый Н.С. 565
Ласткин В.А. 511
Лебедева Е.Д. 383
Лебенкова С.К. 289, 321, 323
Левкин В.В. 153
Левусь М.В. 105, 183
Левченко А.С. 471
Леонов Н.Б. 73
Летова Е.Ю. 623
Лиокумович Л.Б. 221
Липатов Д.С. 171, 177
Липовский А.А. 401
Лисьих Б.И. 41
Литвинов И.К. 687, 691
Лобанов В.Е. 99, 121
Лобанов П.Ю. 601
Лозинг Н.А. 67
Лосевский Н.Н. 151, 159, 645
Лотин А.А. 141
Лузанов В.А. 527
Лукьянов В.К. 389
Лунёв А.Ю. 325, 327
Лупин А.В. 633
Лякин Д.В. 701
Ляликов А.М. 663, 675, 683
Лямин А.В. 443
Ляхович (Шостка) Н.В. 649
Ляхомская К.Д. 575

-М-

Майдыковский А.И. 453
Майер К.А. 285

Майорова А.М. 151
Макаров П.А. 147
Макейкин Е.Н. 607
Макин В.С. 89
Макин Р.С. 89
Маковецкий А.А. 391
Максимов Д.В. 653, 657
Максимова Л.А. 701
Малахов К.М. 207
Маликов А.Ф. 449
Малышкина О.В. 503
Мальцев В.В. 535
Малютина Е.В. 651, 655
Мамян К.А. 93
Манукян М.С. 551
Манучаров Д.Р. 667
Маняк А.П. 265
Маргарян И.В. 267
Мареев Е.И. 31, 413, 425
Маркварт А.А. 219
Маркин С.В. 607
Марков Д.А. 585
Марков З.С. 269
Мартынов И.В. 81
Мартынов И.Л. 109
Мартынова М.А. 409
Мартьянов А.К. 279
Масалов А.В. 117
Маскевич А.А. 345
Маскевич С.А. 345
Маслобоева С.М. 513, 525
Маслова В.А. 157
Маслова Ю.Я. 187
Матвеев И.П. 645
Матвеева Т.Г. 507
Махсудов Б.И. 495
Машек И.Ч. 393, 397
Машошин Д.А. 603, 695
Медведев И.Д. 579
Мезенцев М.Е. 219
Мелехов А.П. 411
Мельник М.В. 149
Мельникова Е.А. 47
Мешков М.Н. 601
Мигаль Е.А. 103, 107, 111, 637
Мизяк Л.А. 471
Миксюк Ю.И. 43
Миленкович Т. 71, 75
Мильшина Л.Д. 289, 321,323
Минаев Н.В. 413, 419, 425, 431
Минин И.В. 589, 593, 597
Минин О.В. 589, 593, 597
Миниханов Т.З. 269
Миронов П.П. 573
Мирущенко М.Д. 301, 381
Митусова К.А. 79
Михайлов Н.Н. 275
Михалев П.А. 425
Михалевский В.А. 141
Михарев Е.А. 325, 327
Мишин А.Ю. 255
Могильный В.В. 679
Можаева М.Д. 413, 431
Моисеева Е.О. 335
Молчанова А.Д. 55
Мольков Т.С. 109
Морозов Д.В. 189
Морозов И.А. 535
Моршнев С.К. 215
Москалев Д.Н. 49, 543
Мотз Г.А. 243
Мотовилов А.А. 559, 563
Муратов Д.А. 77
Мурзина Т.В. 453
Мусихин С.Ф. 509
Мухамедянов А.Р. 595
Мысина Н.Ю. 701

-Н-

Набилкова А.О. 149
Навныко В.Н. 531, 541, 677
Надолинский А.М. 363
Надькин Л.Ю. 575
Назаров А.Н. 357
Налбандян В.М. 291
Наниджанян А.К. 465, 469, 477
Наседкин Б.А. 203, 235, 487
Настулявичус А.Н. 155
Наумов А.Ф. 193
Небавский В.А. 195, 567
Неваев А.Е. 617
Невзоров А.А. 141
Нежданов А.В. 561
Нежевенко С.С. 227
Неровная А.А. 97
Нецветаев А.А. 93
Никитин Н.В. 239, 491
Никитин С.П. 463

Николаев Н.Э. 77
Николаева И.Н. 451
Николаенко Т.В. 677
Никоноров Н.В. 349
Новиков В.Б. 113
Носов И.Ю. 459

-О-

Овчаренко Б.Д. 59, 179
Овчинников А.С. 713, 725
Овчинников К.А. 547
Омарбекова Г.И. 307
Опарин Е.Н. 203, 235
Орехова Н.А. 409, 421
Орлова А.О. 335
Орлова Т.Н. 261, 689
Осадченко А.В. 319, 361
Осичева А.Ю. 723
Откупман Д.Г. 599
Отпущенников Л.А. 305

-П-

Павленко Д.В. 697, 721
Павлов А.В. 251
Павлов В.И. 189, 545
Павлов И.Н. 643, 665
Павлов П.В. 137, 667
Павлов С.В. 465
Пазоев А.Л. 259
Палатников М.Н. 81, 513, 517, 521, 525
Палатникова О.В. 525
Палехова А.В. 73, 387
Панаи А. 207
Панин Г.Н. 213
Панина Е.К. 351
Пантелеева Е.П. 47
Паньков А.С. 167
Парамонов Г.С. 57
Парфенов М.В. 165
Патапович М.П. 385, 389
Патолятов А.Д. 191
Патрикеев В.Е. 605
Патрикеева Е.Ю. 613
Петров А.В. 511
Петров В.М. 467, 651, 655
Петров Н.В. 261, 267, 689
Петров Н.И. 127, 591
Петрова Е.К. 703, 721
Петухов М.И. 553
Пикулев В.Б. 521
Пикуль О.Ю. 549
Писарева Е.В. 433
Писаревский Ю.В. 31
Пискунова Е.Р. 639
Плеханов А.А. 109
Плёнкин А.П. 197
Плотников Н.В. 283
Погиба А.Ю. 611
Погонышев А.О. 483
Подсвиров О.А. 339
Позднякова Д.С. 155
Полетаев Д.А. 669
Поляков А.В. 569
Пономарев Р.С. 167, 557
Пономаренко Д.М. 463
Поняев А.И. 347
Попов А.А 35
Попов В.В. 69, 591
Попов В.С. 71, 75
Попов С.М. 171, 177, 391
Попова М.Н. 63
Потёмкин Ф.В. 31, 103, 107, 111, 637
Пржиялковский Я.В. 215
Провоторов П.С. 309
Прокопова Д.В. 645, 659
Пронин И.А. 311
Проскурин С.Г. 641
Прохоренков Н.О. 271
Прохоров А.В. 35, 95, 101
Прохоров В.П. 555
Пудовкин М.С. 83, 133
Пустовалов А.В. 671
Путилин А.Н. 257
Путилин Н.А. 257
Пухтеев А.О. 421
Пучков Н.И. 507
Пушкарев Д.В. 105, 183
Пушкин А.В. 103, 107, 111, 637
Пчелкина Н.В. 459
Пятибратов К.А. 211
Пятышев А.Ю. 525

-Р-

Рабенандрасана Ж. 477
Рабош Е.В. 267
Равин А.Р. 671
Раднатаров Д.А. 423
Ральченко В.Г. 279

Расковская И.Л. 665
Растрыгин Д.С. 497, 499
Рахимова У.Дж. 495
Резцов Т.В. 261, 689
Решетников Д.Д. 467, 651, 655
Решетов И.В. 401
Решетова М.В. 419
Ридер М.А. 335
Ризаев Г.Э. 105, 183
Рогалев С.Д. 393, 397
Рогалин В.Е. 503
Рогов С.А. 631
Рогожников Г.С. 429, 439, 447, 451
Родин В.Г. 239, 725
Розенталь С.Р. 85
Романов К.Р. 489
Романова А.А. 441
Романова А.В. 61
Росчихмарова Ю.Д. 607
Руди П.А. 447
Рудой К.А. 549
Рудый С.С. 87
Румянцев Б.В. 103, 107, 637
Румянцев В.В. 365
Румянцев И.А. 207
Рунина К.И. 329
Русинов А.П. 291
Русинов Г.Л. 331
Рыбалтовский А.А. 171, 177
Рыжов А.С. 61
Рымов Д.А. 273, 717, 719
Рябов Н.А. 427
Рябухо В.П. 693, 701
Ряховский Д.В. 171, 177, 391

-С-

Савельев Е.Д. 553
Савельев М.В. 581
Савельева Т.А. 153
Савин А.В. 237
Савченков Е.Н. 523
Савченкова Е.А. 713
Сагателян Г.Р. 639
Сагитов Г.М. 601
Садырова В.Р. 131
Саечников К.А. 43
Сазонов А.И. 215
Салахутдинов Г.Х. 411
Салова А.В. 687, 691
Самсонова Л.Г. 331
Сапожников М.В. 383
Сапожников М.В. 461
Сараева И.Н. 155
Сафиуллина П.А. 319, 361
Сватикова П.Д. 393, 397
Свинцов А.А. 247
Свистунов А.С. 715, 717, 719
Седов В.С. 279
Седова Ю.К. 431
Сектаров Э.С. 317
Селезнев Л.В. 105, 183
Селиванова Л.В. 445
Селюков А.С. 319, 361
Семенов А.П. 605
Семенова И.В. 647, 687, 691
Семёнова О.И. 63
Семибратова Е.С. 437
Сенчурова А.В. 399
Сергеев М.М. 293, 349
Сетейкин А.Ю. 249
Сигаев А.П. 311
Сидоров А.И. 325, 327, 339, 357
Сидоров Г.Ю. 275
Сидоров Н.В. 81, 513, 521, 525
Сидорова М.Н. 355
Сидорюк О.Е. 601
Силин А.А. 123
Сингх Р. 135
Синичкина Ю.А. 187
Сироткин А.А. 59, 179, 399
Скиданов Р.В. 243
Скрыбыкина А.А. 439
Скрылев А.А. 561
Скурлов И.Д. 353
Смирнов К.А. 453
Смирнов М.В. 513, 521, 525
Смолянинов Н.Н. 175
Соболева Е.В. 87
Сойфер Ф.И. 455
Соколенко Б.В. 649, 669
Соколов Ю.М. 591
Соколова Д.А. 339
Соловьев В.Г. 507
Соломатин О.А. 487
Соломашенко А.Б. 639
Солохин С.А. 185
Сосунов А.В. 553
Сотникова Н.В. 237

Сошников Д.В. 243
Спектор И.Е. 505
Стариков Р.С. 169, 195, 239, 245, 273, 567, 697, 717, 719, 721
Старостин Н.И. 215
Стасевич Д.Е. 679
Степанов И.Г. 689
Степанов И.И. 189
Стоякин В.В. 591
Страхов С.Ю. 237
Строганова Е.В. 551
Судас Д.П. 145
Суханов Г.А. 237
Сыч Д.В. 723
Сычугин С.А. 57
Сюй А.В. 35, 81, 295

-Т-

Тамбовский А.Д. 605
Тарасевич Е.А. 67
Тарванен Д.А. 181
Татаринов Д.А. 359
Теретёнков А.Е. 135
Терпицкий А.Н. 401
Тимкина Ю.А. 381
Тимофеева И.О. 309
Тимченко Е.В. 427, 433, 437, 443
Тимченко П.Е. 427, 433, 437, 443
Титов Р.А. 513, 521, 525
Титова А.М. 561
Титова А.О. 653, 657
Тихомиров С.В. 201, 475, 479, 483
Токко О.В. 517, 521
Толмачева В.В. 139
Толордава Э.Р. 155
Толстик А.Л. 43, 47
Топоровский В.В. 469, 481, 485, 493, 635, 661
Третьяков Д.А. 195, 567
Трещиков В.Н. 463, 491
Трибельский М.И. 39
Трифонова Е.В. 197
Тронев А.В. 165
Трошин О.С. 223
Трунин Д.А. 443
Тынышова Т.Д. 681
Тюнин А.Н. 627
Тяжелов И.А. 279

-У-

Уденеев А.М. 449
Умаров М.Ф. 533, 537
Урюпина В.К. 151, 159
Усиевич Б.А. 591
Усикова А.А. 165
Уточникова В.В. 69
Ушаков Н.А. 219, 221
Ушаков Ф.А. 703
Ушакова Е.В. 301, 381, 445
Ушков А.А. 295

-Ф-

Фадеев С.В. 109
Фазлиев Т.Ш. 721
Фарех Р. 241
Фащевский А.П. 693
Федоров Е.К. 643
Федоров П.П. 505
Федоров С.А. 365
Федорова А.В. 531
Федянин А.А. 69, 93, 97, 139
Филатов А.Л. 209
Филатов В.В. 367, 371, 375
Филатов Н.А. 73
Филатова С.А. 173
Филипов И.М. 199
Филиппов И.А. 311
Фофанов Д.А. 161
Фролов А.Ю. 69, 93, 97, 139
Фролов О.О. 427, 433, 437, 443

-Х-

Хайруллин Ф.Н. 529
Хакимов К.Т. 71, 75
Халилов С.И. 653, 657
Харасов Д.Р. 463, 491
Харенко Д.С. 175
Харитончик Р.А. 421
Харнас С.С. 153
Хатырев Н.П. 395, 457
Хмельницкий Р.А. 155
Хопёрский А.Н. 363
Хорьков К.С. 35
Храмцов Э.А. 679
Худайберганов Т.А. 315, 369

-Ц-

Цветинович Ю. 419

Цветков В.Б. 173
Цветков А.В. 507
Целиков Г.И. 35, 295
Целиков Д.И. 81
Целогородцев К.А. 159
Цуканов А.В. 125
Цыпкин А.Н. 149, 203, 235, 487
Цюрко Д.Е. 335

-Ч-

Чаморовский Ю.К. 171, 177
Чебакова С.А. 367
Чекмасов С.П. 441
Чепурин Е.Ф. 561
Черевков С.А. 301, 353
Черёмхин П.А. 239, 273, 705, 709, 713, 715, 719, 725
Чермошенцев Д.А. 99, 117, 121, 189
Черников А.С. 35
Чернов А.И. 277
Черноусов Д.А. 229
Черных А.В. 261, 689
Чехлова Т.К. 77
Чиглинцев Э.О. 277
Чинь Н.Х. 385, 389
Чипизубова Е.А. 617
Чирков С.В. 175
Чистяков А.А. 109
Чистяков В.В. 199
Чистякова С.А. 517
Чубаров Д.М. 497, 499
Чувакова М.А. 41
Чуков В.Н. 583
Чутри К. 241

-Ш-

Шадрин Е.Б. 309
Шаленов А.С. 431
Шалин А.С. 85, 579
Шалыгина О.А. 35
Шамрай А.В. 165
Шандаров С.М. 51, 519, 523, 541
Шарангович С.Н. 497, 499
Шарипова М.И. 139
Шахматов А.Ю. 723
Шахмин А.А. 509
Шевякова К.В. 277
Шелыгина С.Н. 155
Шепелев А.Е. 185
Шестаков Д.В. 561
Шестаков С.А. 339
Шестериков А.В. 35, 95, 101
Шешин Е.П. 343
Шипко В.В. 223
Шипулин А.В. 37, 207
Ширшин Е.А. 441
Шитиков А.Е. 99, 121
Шитов С.А. 665
Шитц Д.В. 263, 435
Шифрина А.В. 245, 273, 709, 717
Шишова М.В. 711
Шкадаревич А.П. 679
Шмойлова С.С. 587
Шойдин С.А. 259
Шуклов И.А. 65, 71, 75
Шулбаева Д.С. 439
Шулейко Д.В. 143
Шулындин П.А. 103, 637
Шумигай В.С. 235
Шумилкина Ю.Р. 367
Шур В.Я. 41, 553
Шутова О.А. 131

-Щ-

Щербак С.А. 401
Щербинин Д.П. 61, 87
Щуко А.В. 385, 389

-Э-

Эгамов М.Х. 495

-Ю-

Юнусов Т.Р. 117
Юсупов В.И. 431
Юшицына В.В. 197

-Я-

Яковенко Н.А. 555
Яковлев Д.В. 449
Якубов С.И. 653, 657
Якубовский Д.И. 295, 355
Якушев М.В. 275
Якушова Н.Д. 311
Ялов А.П. 581
Яников М.В. 507
Янь Ч. 711
Ярыгин М.А. 465, 477, 489