

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

**XI МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПО ФОТОНИКЕ И ИНФОРМАЦИОННОЙ
ОПТИКЕ**

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Москва

УДК 535(06)+004(06)

ББК 72г

Н 34

**XI МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФОТОНИКЕ И
ИНФОРМАЦИОННОЙ ОПТИКЕ: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ,
2022. – 664 с.**

Сборник научных трудов содержит доклады, включенные в программу XI Международной конференции по фотонике и информационной оптике, проходившей 26 - 28 января 2022 г. 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 16 января 2022 года.
Материалы издаются в авторской редакции.

ISBN 978-5-7262-2842-6

© Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ», 2022

Подписано в печать 26.01.2022. Формат 60×84 1/16.

Печ. л. 41,5. Тираж 60 экз. Заказ №1.

*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

Евтихий Н.Н. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Альтшулер Г.Б. – IPG-Medical Corp., Marlborough, USA

Вишняков Г.Н. – Всероссийский научно-исследовательский институт
оптико-физических измерений, Москва

Волостников В.Г. – Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

Габитов И.Р. – University of Arizona, Tucson, USA

Десятников А.С. – Australian National University, Canberra, Australia

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

Маймистов А.И. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Маломед Б. – Tel Aviv University, Israel

Потатуркин О.И. – Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

Ромашко Р.В. – Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН,
Владивосток

Рябухо В.П. – Национальный исследовательский Саратовский государственный
университет

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»

Ученый секретарь:

Родин В.Г. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

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

СОДЕРЖАНИЕ

ДРАЧЕВ В.П.	
Плазмон-поляритоны в объёме гиперболических сред.....	28
ШУР В.Я., АХМАТХАНОВ А.Р., ЕСИН А.А., ЧУВАКОВА М.А., КОЛКЕР Д.Б., БОЙКО А.А., ПАВЕЛЬЕВ В.С.	
Периодически поляризованные кристаллы и тонкие плёнки сегнетоэлектриков для преобразования частоты света и дифракционных оптических элементов.....	31
ФРАДКИН И.М., ДЯКОВ С.А., ГИППИУС Н.А.	
Гомогенизация Ми-резонансных метаматериалов.....	33
ЗИМНЯКОВ Д.А., ВОЛЧКОВ С.С., КОЧКУРОВ Л.А., ДОРОГОВ А.Ф., ЦЫПИН Д.В.	
Индукцированная флуоресценция при лазерной накачке случайно- неоднородных сред: фундаментальные ограничения, обусловленные когерентностью излучения накачки.....	35
ГАБИТОВ И.Р., ГИБНИ Д., КУК И.А.	
Методы машинного обучения и передача информации в когерентных системах с нелинейностью.....	37
КАТКОВНИК В.Я., ШЕВКУНОВ И.А., ЕГИЗАРЯН К.О.	
Вычислительное формирование изображений с использованием кодирующих дифракционных элементов.....	40
ГОНЧАРОВ Д.С., СТАРИКОВ Р.С.	
Когерентные оптико-цифровые корреляторы изображений с нейросетевой обработкой выходных сигналов.....	42
КОМПАНЕЦ И.Н.	
Н.Г. Басов и лаборатория (отделение) квантовой радиофизики ФИАН.....	44
СЛЮСАРЕНКО С.С., МЕЛЬНИКОВА Е.А., ТОЛСТИК А.Л., ЛУККЕТТИ Л., СИМОНИ Ф.	
Фотовольтаический эффект в ЖК-ячейках, допированных метиловым красным.....	46
БАКЛАНОВА К.Д., ДОЛГАНОВ П.В., ДОЛГАНОВ В.К.	
Периодические структуры в жидкокристаллических фотонных кристаллах....	48
КЛИШИН Ю.А., ЯКУБОВСКИЙ Д.И., ТАТМЫШЕВСКИЙ М.К., АРСЕНИН А.В., КАЗАРЯН Д.А., ВОЛКОВ В.С.	
Стабильность тонких кристаллов CoPS_3	50
СИДОРОВА О.В., КАДЕТОВА А.В., ПАЛАТНИКОВ М.Н.	
Дефектная структура кристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$, выращенных методами прямого и гомогенного легирования.....	52
КОРИБУТ А.В., КИНЯЕВСКИЙ И.О., КОВАЛЕВ В.И., ДАНИЛОВ П.А., СМИРНОВ Н.А., КУДРЯШОВ С.И., ДУНАЕВА Е.Э., ИОНИН А.А.	
Влияние геометрии взаимодействия на эффективность нестационарного ВКР в кристалле BaWO_4	54

ДОРОФЕЕВА Е.В., МАНУЙЛОВИЧ И.С., МЕШКОВ М.Н., СИДОРЮК О.Е. Угловая анизотропия рассеяния света поверхностями кристаллов КТР и её использование при кристаллографической ориентации нелинейных оптических элементов.....	56
АМАНОВА М.А., НАВНЫКО В.Н., МАКАРЕВИЧ А.В., ШЕПЕЛЕВИЧ В.В. Применение ковариантных методов для определения отличных от нуля компонент флексоэлектрического тензора в кристаллах класса симметрии 23.....	58
САВЧЕНКОВ Е.Н., ШАНДАРОВ С.М., ДУБИКОВ А.В., КУЗЬМИЧ Д.Е., ФЕДЯНИНА М.А., ГУБИНСКАЯ Д.А., ШУР В.Я., АХМАТХАНОВ А.Р., ЧУВАКОВА М.А. Дифракция световых пучков на регулярных доменных структурах в танталате лития.....	60
ВОРОБЬЕВ А.К., ОСТАПИВ А.Ю., ГРИЩЕНКО И.В., КОНЯШКИН А.В., РЯБУШКИН О.А. Измерение коэффициентов оптического поглощения и рассеяния лазерного излучения в нелинейно-оптических кристаллах трибората лития и ниобата лития.....	62
БЕГИЧЕВ И.В., КЛИШИН Ю.А., ТОКСУМАКОВ А.Н., ЕРМОЛАЕВ Г.А., ЯКУБОВСКИЙ Д.И., АРСЕНИН А.В., КАЗАРЯН Д.А., ВОЛКОВ В.С. Спектральная эллипсометрия атомарно тонких кристаллов.....	64
КУПРЕЙЧИК М.И., БАЛАХШИЙ В.И., МАНЦЕВИЧ С.Н. Низкоселективные режимы изотропного рассеяния света в двуосном кристалле йодида индия.....	66
СЛИНЬКОВ Г.Д., ЮШКОВ К.Б. Анализ угловой дисперсии акустооптического дефлектора.....	68
КРИВЕНКОВ В.А., САМОХВАЛОВ П.С., РАКОВИЧ Ю.П., ВАСИЛЬЕВСКИЙ И.С., КАРГИН Н.И., НАБИЕВ И.Р. Нелинейное плазмон-экситонное взаимодействие улучшает двухфотонные свойства квантовых точек.....	70
КОСОЛАПОВА К.Д., ВЕДЕРНИКОВА А.А., АРЕФИНА И.А., УШАКОВА Е.В. Исследование энергетической структуры электронных переходов углеродных точек в зависимости от типа функциональных групп на поверхности.....	72
СЮЙ А.В., ЦЕЛИКОВ Г.И., ПАНОВА Д.А., АРСЕНИН А.В., ВОЛКОВ В.С. Фотолюминесцентные свойства наночастиц на основе ZnS.....	74
КАРМАЗИН Л.И., КОРШУНОВ В.М., МЕТЛИН М.Т., ТАЙДАКОВ И.В. Исследование фотофизических свойств новых координационных соединений на основе ионов лантаноидов с излучением в инфракрасном диапазоне.....	76
ОСКОЛКОВА Т.О., КОЛЕСОВА Е.П., ОРЛОВА А.О. Перенос энергии электронного возбуждения в агрегатах квантовых точек CdSe/ZnS.....	78

ВОСКАНЯН Г.Р., ГРИЦИЕНКО А.В., МАТВЕЕВ А.Т., КУРОЧКИН Н.С., ЕЛИСЕЕВ С.П., ВИТУХНОВСКИЙ А.Г.	
Генерация одиночных фотонов в дефектах нанокристаллов гексагонального нитрида бора.....	80
ПАУКОВ М.И., БУДНИКОВ А.А., ГОЛЬДТ А.Е., КОМАНДИН Г.А., СЮЙ А.В., ЯКУБОВСКИЙ Д.И., НАСИБУЛИН А.Г., БУРДАНОВА М.Г.	
Сравнительная характеристика оптических свойств нанотрубок на основе углерода и дисульфида вольфрама.....	82
ПОПОВ В.С., ЛАВРЕНТЬЕВ Н.А., МИРОФЯНЧЕНКО А.Е., МИРОФЯНЧЕНКО Е.В., ПОНОМАРЕНКО В.П.	
Двумерные наноструктурированные материалы для фотоники на основе теллурида висмута.....	84
ЯКУБОВСКИЙ Д.И., АРСЕНИН А.В., КИРТАЕВ Р.В., МИРОНОВ М.С., КЛИШИН Ю.А., ДОРОШИНА Н.В., НОВИКОВ С.М., ВОЛКОВ В.С.	
Ближнепольная оптическая микроскопия ультратонких металлических плёнок на двумерных слоях MoS_2	86
МАРГАРЯН И.В., БАБАЕВ А.А., ЛИТВИН А.П.	
Функционализация перовскитного слоя углеродными точками.....	88
ГАРИФУЛЛИН А.И., ГАЙНУТДИНОВ Р.Х., ХАМАДЕЕВ М.А.	
Квантово-электродинамические эффекты в фотонных кристаллах и управление частотами фотонов, излучаемых квантовой точкой.....	90
ЮРЧЕНКО Д.А., ЕВСТРОПЬЕВ С.К., ШАШКИН А.В., ДУКЕЛЬСКИЙ К.В., КНЯЗЯН Н.Б., МАНУКЯН Г.Г., СТОЛЯРОВА В.Л.	
Спектральные свойства Eu-содержащей стеклокерамики $\text{BaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-MgF}_2$	92
ЖИГАРЬКОВ В.С., МИНАЕВ Н.В., ЮСУПОВ В.И.	
Физические аспекты лазерно-индуцированного переноса живых клеток в гелевых микрокаплях.....	94
ЛЬВОВ К.В., СТРЕМОУХОВ С.Ю., ПОТЕМКИН Ф.В.	
Динамика свободных носителей в объёме кремния при воздействии фемтосекундного лазерного излучения.....	96
ТРИФОНОВА А.В., РЯМБОВ Р.В.	
Безрезонаторная лазерная генерация в растворах органического красителя с наночастицами при возбуждении нано- и фемтосекундными лазерными импульсами.....	98
АФАНАСЬЕВ Н.А., МОСКВИН М.К., ПРОКОФЬЕВ Е.В., ОДИНЦОВА Г.В.	
Влияние эллиптичности поляризации лазерного излучения на упорядоченность лазерно-индуцированных поверхностных периодических структур.....	100
ФРАНК А.Д., ЖИГАРЬКОВ В.С., ЧЕПЦОВ В.С., МИНАЕВ Н.В., ЮСУПОВ В.И.	
Лазерно-индуцированный перенос эукариотических микроорганизмов в гелевых микрокаплях.....	102

ЕГОРОВА К.А., КОЗИНА А., ПЕРЕПЕЛКИНА С.Ю., СИНЕВ Д.А. Управление износостойкостью титановых сплавов методом аддитивной лазерной обработки.....	104
БЕЛОВ К.Н., ДЁМИНА Л.И., ЖЕРЕБЦОВ Д.А., ИВАНОВ М.Г., КУНДИКОВА Н.Д. Исследование микроструктуры лазерной керамики на основе Yb:YAG, Yb:LuAG, Pr:LuAG – возможности методов.....	106
ПРОКОФЬЕВ Е.В., АФАНАСЬЕВ Н.А., МОСКВИН М.К. Формирование динамических визуальных эффектов за счёт лазерного структурирования поверхности металлов.....	108
ЧЕРНЫХ Е.А., ХАРИНЦЕВ С.С. Определение локальной температуры стеклования тонкой полимерной плёнки с помощью термоплазменной метаповерхности.....	110
САПАРИНА С.В., ХАРИНЦЕВ С.С. Наноспектроскопический анализ аморфных углеродных плёнок методом гигантского комбинационного рассеяния света с электронагревом образца.....	112
МИНАЕВА Е.Д., АНТОШИН А.А., МИНАЕВ Н.В. Исследование процесса лазерно-индуцированного прямого переноса агрегатов из живых клеточных культур – клеточных сфероидов.....	114
КОНЦЕВАЯ В.Г., КУЛИКОВ К.Г., ЕГОРОВА О.А. Определение спектральных характеристик светорассеяния на группе биологических частиц различной формы и структуры.....	116
ВОХНИК О.М., КОРОЛЕНКО П.В. Особенности взаимодействия излучения с веществом в аналитическом резонаторе лазерного спектрометра.....	118
ГАЛКИН М.Л., ЛОНШАКОВ Е.А., МИНЬКОВ К.Н., ДАНИЛИН А.Н., БИЛЕНКО И.А. Исследование спектральных характеристик диодного лазера, затянутого на внешний резонатор с модами шепчущей галереи.....	120
ГОРБУНКОВ М.В., ЕРМАКОВ В.С., МАСЛОВА Ю.Я., ШАБАЛИН Ю.В. Динамика твердотельного лазера, управляемого двумя электрооптическими обратными связями, в режиме гармонической синхронизации мод.....	122
ИБРАГИМОВ А.А., ШОРОХОВ А.С. Модуляция света полупроводниковыми метаповерхностями при электрической инжекции свободных носителей.....	124
СМИРНОВ В.Н., СЕМЕРИКОВ И.А., ЗАЛИВАКО И.В., БОРИСЕНКО А.С., АКСЕНОВ М.Д., СИДОРОВ П.Л., СЕМЕНИН Н.В., ЖУРАВЛЕВ И.А., ХАБАРОВА К.Ю., КОЛАЧЕВСКИЙ Н.Н. Охлаждение иона иттербия 171 до основного колебательного состояния с использованием квадрупольного перехода.....	126

ЛЫКОВ И.И., ШИТИКОВ А.Е., ДАНИЛИН А.Н., ЛОБАНОВ В.Е., БИЛЕНКО И.А.	
Измерение сверхмалых скоростей с помощью лазера в режиме затягивания.....	128
РЫМКЕВИЧ В.С., БОЛОШКО А.А.	
Применение наносекундных импульсов для лазерно-индуцированной обработки стекла микроплазмой.....	130
ЩЕКИН А.С., ЖАНАБАЕВА А.К., ПЕТРОВСКИЙ В.Н.	
Методика расчёта краевого угла смачивания при прямом лазерном структурировании поверхности наносекундными импульсами.....	132
ДОЛГОПОЛОВ А.Д., ГРЕСЬКО В.Р., ЖЕСТКИЙ Н.А., СЕРГЕЕВ М.М., МИХАЙЛОВА Ю.В., ГУНИНА Е.В.	
Лазерная запись периодических микро- и наноразмерных структур на поверхности тонких плёнок.....	134
САВЕЛЬЕВ Е.А.	
Зависимость чувствительности резонанса затухающей моды от показателя преломления покрытия оптического волокна.....	136
ГОРЕЛОВ И.К., МКРТЧЯН А.А., ГЛАДУШ Ю.Г., ШИТИКОВ А.Е., ЛОБАНОВ В.Е., БИЛЕНКО И.А.	
Исследование характеристик микрорезонатора с нанесёнными на поверхность углеродными нанотрубками.....	138
МАЛЫШЕВ О.К., ХАРИНОВА Т.А., МАРТЫНОВ И.Л., ЧИСТЯКОВ А.А.	
Особенности моделирования спектров отражения фотонных кристаллов из пористого кремния в видимой области спектра.....	140
ПРОХОРОВ А.В., ВОЛКОВ В.С., ЕВЛЮХИН А.Б.	
Фотонные связанные состояния в метаповерхностях на основе наночастиц из диалкогогенидов переходных металлов.....	143
БИКБАЕВ Р.Г., ПЫХТИН Д.А., ВЕТРОВ С.Я., ТИМОФЕЕВ И.В.	
Плазмонные массивы для увеличения поглощения солнечного элемента на основе таммовского плазмон-поляритона.....	145
КОПЫЛОВ Д.А., РАСПУТНЫЙ А.В.	
Исследование генерации двухфотонных состояний в процессе каскадного гиперпараметрического рассеяния.....	147
АВДЕЕВА А.Ю., БИКБАЕВ Р.Г., ВЕТРОВ С.Я., ТИМОФЕЕВ И.В.	
Таммовский плазмон-поляритон на границе металла и анизотропного напокомпозита, сопряжённого с фотонным кристаллом.....	149
ЧМЕРЕВА Т.М., КУЧЕРЕНКО М.Г., МУШИН Ф.Ю.	
Тушение электронных возбуждений квантовой точки плазмонной оболочечной наночастицей.....	151
ШУТОВА О.А., ТРУШИН С.М.	
Генерация гармоник атомарными газами в фокусе тороидальных мод лазерных полей.....	153

ШИРОКОВА А.В., БАКУНОВ М.И., МАСЛОВ А.В. Адиабатическое преобразование электромагнитных волн в нестационарной среде из осцилляторов.....	155
ШИШКОВ Г.М., ГРИГОРЬЕВ К.С., МАКАРОВ В.А. Сингулярности поляризации при самофокусировке эллиптически поляризованного света в жидких кристаллах.....	157
ИВАХНИК В.В., КАПИЗОВ Д.Р., НИКОНОВ В.И. Качество обращения волнового фронта при четырёхволновом взаимодействии в многомодовом волноводе с тепловой нелинейностью.....	159
КУРНИКОВ М.А., ШИРОКОВА А.В., МАСЛОВ А.В., БАКУНОВ М.И. Дисперсионные эффекты при трансформации волн на временной границе.....	161
АКИМОВ А.А., ГУЗАЙРОВ С.А., ИВАХНИК В.В. Четырёхволновой преобразователь излучения на тепловой нелинейности при наличии обратной связи на сигнальную или объектную волны.....	163
БЕЛИНСКИЙ А.В., СИНГ'Х Р. О возможности рассмотрения квантовых поляризационных характеристик света при формировании квантовых фантомных изображений в процессе встречного четырёхфотонного смешения.....	165
ПОПОВ С.М., БУТОВ О.В., ЛИ СЯ, ЧЖОИН ВАН, ЧАМОРОВСКИЙ Ю.К. Технология демодуляции с распределённым зондированием с большой пропускной способностью на основе плотного идентичного массива волоконных брэгговских решёток.....	167
САЛЬНИКОВ Н.И., ДОРОФЕЕВ В.В., КОСОЛАПОВ А.Ф., АНДРИАНОВ А.В., АНАШКИНА Е.А. Дисперсионные и нелинейные характеристики микроструктурированного теллуритного волокна с сохранением поляризации.....	169
РЯХОВСКИЙ Д.В., ПОПОВ С.М., ИСАЕВ В.А., КОЛОСОВСКИЙ А.О., ВОЛОШИН В.В., ВОРОБЬЁВ И.Л., ЧАМОРОВСКИЙ Ю.К. Оптические потери в металлизированных микроструктурированных оптических волокнах.....	171
ГИЛЕВ Д.Г., КРИШТОП В.В. Определение зависимости наведённого двулучепреломления от радиуса изгиба по положению боковых резонансных пиков.....	173
СУДАС Д.П., САВЕЛЬЕВ Е.А., ЯКУЩЕВА Г.Г., КУЗНЕЦОВ П.И. Оптоволоконный рефрактометр с покрытием из диоксида олова для измерения параметров концентрированных кислот.....	175
ПАРОЧКИН А.В., БУШУНОВ А.А. Просветляющие микроструктуры на лазерных волноводах.....	177
БОРОДИНА Л.Н., БОРИСОВ В.Н., АННАС К.И., ДУБОВИК А.Ю., ВЕНИАМИНОВ А.В., ОРЛОВА А.О. Лазерная микроскопия фотоиндуцированных структур из квантовых точек.....	179

МЕЛЬНИКОВ А.Н. Новый подход в задаче формообразования тороидальных дифракционных решеток.....	181
ДЕНИСОВ Д.Г., КАРАСИК В.Е., АЗАРОВА В.В. Исследование особенностей процессов рассеяния лазерного излучения на шлифованных и полированных оптических поверхностях.....	183
УС Н.А., АВЕРШИН А.А., МУРАВЛЕВ М.В. Оптическое покрытие для внешнего резонатора-расщепителя.....	185
АЗАРОВА В.В., ИЩЕНКО П.И., КУЛАГИН А.В., ОГЛЮБЛИН М.С., ФОКИН В.В., ЧЕРТОВИЧ И.В. Особенности получения высокоотражающих интерференционных лазерных зеркал.....	187
КРАСНОВ Д.И., ДРУЖИН В.В. Анализ ошибки установки выпуклого гиперболического зеркала при контроле с помощью дифракционного корректора.....	189
ЗОТОВ А.М., КОРОЛЕНКО П.В., КУБАНОВ Р.Т. Алгоритмы генерации и свойства фрактальных спекл-полей.....	191
ДАВЛЕТШИН Н.Н., ИКОННИКОВ Д.А., СУТОРМИН В.С., БАРОН Ф.А., ВЬЮНЫШЕВ А.М. Формирование спекл-структур для метода фантомных изображений с помощью нематической жидкокристаллической ячейки.....	193
ИСМАГИЛОВ А.О., ЛЕЙБОВ Л.С., ЗАЛИПАЕВ В.В., НАСЕДКИН Б.Н., ГРАЧЕВ Я.В., ПЕТРОВ Н.В., ЦЫПКИН А.Н. Формирование спекл-структур с помощью широкополосного терагерцового излучения и их применение для реализации ghost imaging.....	195
БЫЧКОВА С.А., МИНАКОВ Ф.А., МАКСИМОВ Л.В., МАМРАШЕВ А.А., НИКОЛАЕВ Н.А. Поляризационная терагерцовая спектроскопия.....	197
ЦИПЛАКОВА Е.Г., ПЕТРОВ Н.В., ПЕРРО Ж.-Б., ЧОПАРД А., ГИЙЕ Ж.-П., СМОЛЯНСКАЯ О.А., МОНЕ П. Оптимизированные итерационные алгоритмы восстановления фазы применительно к терагерцовому диапазону частот.....	199
ОБЫДЕННОВ Д.В., ЮШКОВ К.Б., МОЛЧАНОВ В.Я. Исследование эффективности захвата кольцевой оптической ловушки на основе акустооптического перестраиваемого фильтра.....	201
САБИРОВ Т.Н., МИННЕГАЛИЕВ М.М., ГЕРАСИМОВ К.И., МОИСЕЕВ С.А. Реализация протокола оптической квантовой памяти в кристалле $^{167}\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$	203
ЯКУБОВ С.И., СОКОЛЕНКО Б.В., ШОСТКА Н.В., ПОЛЕТАЕВ Д.А. Профилометрия оптически прозрачных объектов с помощью интерferирующих сингулярных пучков.....	205

ПРОКОПОВА Д.В., САМАГИН С.А., КОТОВА С.П. Формирование вращающихся световых полей с двумя выраженными максимумами в распределении интенсивности при помощи комбинированных двухсекционных оптических элементов.....	207
БУРЦЕВ А.А., ИОНИН В.В., КИСЕЛЕВ А.В., ЕЛИСЕЕВ Н.Н., МИХАЛЕВСКИЙ В.А., ЛОТИН А.А. Элементы оптических нейроморфных систем на основе фазоизменяемых материалов.....	209
ИКОННИКОВ Д.А., ФОКИН В.А., ВЬЮНЫШЕВ А.М. Получение комплексных массивов оптических вихрей с помощью бинарных фазовых голограмм.....	211
КУЗЬМИН Н.А., АРАПОВ Ю.Д. Пороговая концентрация частиц при голографическом восстановлении мультидисперсных сред.....	213
ПАВЛОВ А.В., ГАУГЕЛЬ А.О. Моделирование принятия решений в условиях противоречий методом голографии Фурье: влияние фильтрации на выбор альтернатив.....	215
КАЛИНИНА А.А., ПУТИЛИН А.Н. Оптическая система очков дополненной реальности на основе комбинации голограмм.....	217
АФАНАСЬЕВА О.Л. Голографический коллиматорный прицел на основе волновода.....	219
ПУТИЛИН Н.А., ДУБЫНИН С.Е., ПУТИЛИН А.Н., КОПЕНКИН С.С., БОРОДИН Ю.П. Искажения записи и воспроизведения голографических бим-комбайнеров для дисплеев дополненной реальности.....	221
БЕЛАШОВ А.В., ЖИХОРОВА А.А., БЕЛЬТЮКОВА Д.М., ЛИТВИНОВ И.К., САЛОВА А.В., БЕЛЯЕВА Т.Н., КОРНИЛОВА Е.С., СЕМЕНОВА И.В., ВАСЮТИНСКИЙ О.С. Комбинированный мониторинг клеток с помощью флуоресцентной и голографической микроскопий для анализа внутриклеточного накопления фотосенсибилизатора Радахлорин.....	223
КРАЙСКИЙ А.В., МИРОНОВА Т.В. Определение сдвига объекта с субмикронной точностью с помощью цифрового фотоаппарата.....	225
ПОРОЙКОВ А.Ю., МАРЧЕНКОВ А.Ю., ШАРИКОВА М.О., ХОХЛОВ Д.Д. Оптическая диагностика деформаций элементов железнодорожного транспорта.....	227
ПИНАЕВ З.А., ВОЛЫНСКИЙ М.А. Исследование методов сопоставления плотных воксельных данных для задач оптической томографии.....	229
ВАСИЛЬЕВ С.В., БОГОСЛОВСКИЙ А.В., ЖИГУЛИНА И.В., ДЕРБУШ Д.А. Выявление движения объектов-линий на двумерных изображениях.....	231

ВОЛЫНСКИЙ М.А., ГЕНДИН В.Г., ГЛАДКОВА Е.С., ГУРОВ И.П., МАРГАРЯНЦ Н.Б., СИРРО С.В., СКАКОВ П.С.	
Применение метода оптической когерентной томографии для визуализации слоисто-неоднородной микроструктуры предметов иконописи.....	233
МАЛАШИН Д.О., КОШЕЛЕВ А.В.	
Перспективные нейроморфные методы обработки видеoinформации в современных оптико-электронных системах летательных аппаратов.....	235
ЕВТИХИЕВ Н.Н., РЫМОВ Д.А., СТАРИКОВ Р.С., ЧЕРЁМХИН П.А.	
Нейросетевой подход к восстановлению изображений с голограмм.....	237
ГОРЯЕВ М.А.	
Влияние красителя на фотоэлектрические свойства кремниевой <i>n-p</i> структуры.....	239
БУЛЫГА Д.В., ЕВСТРОПЬЕВ С.К., МОСКОВСКИЙ А.Д., ПАШИН С.С.	
Исследование разработанных светопоглощающих оптических композитов на основе эпоксидных полимеров.....	241
ГУСЬКОВ А.А., ЛАВРОВ С.Д.	
Повышение фоточувствительности фотоприёмников на основе двумерного WSe ₂ с упорядоченными плазмонными нанотреугольниками Ag.....	243
КРУЧИНИН Н.Ю., КУЧЕРЕНКО М.Г.	
Электрически индуцированные изменения конформаций полиамфолитов на поверхности вытянутого плазмонного наносфероида.....	245
РИДЕР М.А., БОЛЬШАКОВ А.Д., КОНДРАТЬЕВ В.М., КУЗНЕЦОВ А.С., ЗАХАРОВ В.В., ОРЛОВА А.О.	
Гибридные структуры на основе нитевидных нанокристаллов GaP и углеродных точек.....	247
БУХАРОВ Д.Н., АРАКЕЛЯН С.М.	
Моделирование оптических свойств системы Ag/Au нанокластеров.....	249
ЛЕБЕДЕВА Е.Д., ЛАВРОВ С.Д.	
Моделирование оптического поглощения в квазидвумерных гетероструктурах дихалькогенидов переходных металлов.....	251
ПИМЕНОВ Н.Ю., АВДИЖИЯН А.Ю., ЛАВРОВ С.Д., ЛЕБЕДЕВА Е.Д.	
Моделирование зонной структуры твёрдых растворов двумерных дихалькогенидов переходных металлов.....	253
БАРАНОВ К.Н., КОЛЕСОВА Е.П., ДУБОВИК А.Ю., ОРЛОВА А.О.	
Влияние оболочки из сульфида цинка на оптические свойства нанокмозитов AIS/TiO ₂	255
СЕЙСЕМБЕКОВА Т.Е., БОКАНОВА А.А., АЙМУХАНОВ А.К., ЗЕЙНИДЕНОВ А.К., ИЛЪЯСОВ Б.Р.	
Исследование оптических свойств тонких плёнок ZnO различной толщины.....	257
ГАВРУШКО В.В., ЛАСТКИН В.А., ТЕЛИНА И.С.	
Оптические свойства плёнок поликристаллического кремния.....	259

ВАНИН А.И., ПУЧКОВ Н.И., СОЛОВЬЕВ В.Г., ХАНИН С.Д., ЦВЕТКОВ А.В., ЯНИКОВ М.В.	
О возможности использования эллипсометрии в исследованиях оптических свойств металлодиэлектрических структур на основе опалов.....	261
СЕРЕГИН А.А., ЧЕРНЫШЕВА О.В., ШЕЛЯКОВ А.В., СИТНИКОВ Н.Н., БОРОДАКО К.А., ВЕЛИГЖАНИН А.А., СУНДЕЕВ Р.В.	
EXAFS-спектроскопия быстроокалённых $Ti_{50}Ni_{20}Cu_{30}$ сплавов с эффектом памяти формы.....	263
КАНАПИНА А.Е., АФАНАСЬЕВ Д.А.	
Понижение порога генерации этанольного раствора катионного полиметинового красителя в присутствии наночастиц серебра.....	265
МУССАУИ А., БУЛЫГА Д.В., КУЗЬМЕНКО Н.К., ЕВСТРОПЬЕВ С.К., САДОВНИЧИЙ Р.В., НИКОНОВ Н.В.	
Синтез нанокристаллических порошков YAG:RE методом Печини с использованием поливинилпирролидона.....	267
РОЖКОВА К.С., АЙМУХАНОВ А.К., ИЛЬЯСОВ Б.Р., ТУНГУШБАЕВА Д.Н.	
Влияние спиртового растворителя на оптические характеристики плёнок PEDOT:PSS.....	269
ОМАРБЕКОВА Г.И., АЙМУХАНОВ А.К., ИЛЬЯСОВ Б.Р., НАЖИМХАН Э.Т.	
Влияние температуры отжига на морфологические свойства плёнок In_2O_3 , полученных методом термического испарения в вакууме.....	271
ГАЗИЗОВ А.Р., САЛАХОВ М.Х., ХАРИНЦЕВ С.С.	
Селективное оптоплазмонное усиление антистоксова комбинационного рассеяния света в тонких плёнках оксида графена.....	273
СЕЛИВЕРСТОВА Е.В., ИБРАЕВ Н.Х.	
Влияние времени абляции на свойства наноточек на основе восстановленного оксида графена.....	275
ВАЛИТОВА А.Ф., ГАЗИЗОВ А.Р., САЛАХОВ М.Х.	
Дисперсионные соотношения плазмонных мод на сплошной золотой поверхности с гексагональной структурой.....	277
ОСАДЧЕНКО А.В., ЗАХАРЧУК И.А., ДАЙБАГЕ Д.С., АМБРОЗЕВИЧ С.А., СЕЛЮКОВ А.С., ВОЛОДИН Н.Ю., ЧЕПЦОВ Д.А., ДОЛОТОВ С.М., ТРАВЕНЬ В.Ф.	
Люминесценция новых производных кумарина.....	279
МУССАУИ А., ЕВСТРОПЬЕВ С.К., КУЗЬМЕНКО Н.К., НИКОНОВ Н.В., БУЛЫГА Д.В., САДОВНИЧИЙ Р.В., ИГНАТЬЕВ А.И.	
Модифицированный метод Печини для синтеза нанопорошков $Gd_2O_3:Nd$	281
КОНСТАНТИНОВА Е.И., СЛЕЖКИН В.А., БРЮХАНОВ В.В.	
Влияние рассеивающих наночастиц TiO_2 на фотолюминесценцию плёнок поливинилбутирала с квантовыми точками $CdZnSeS/ZnS$ и молекулами озона.....	283

ДАЙБАГЕ Д.С., ОСАДЧЕНКО А.В., ЗАХАРЧУК И.А., АМБРОЗЕВИЧ С.А., СЕЛЮКОВ А.С., ПЕРЕПЕЛИЦА А.С., СМЕРНОВ М.С., ОВЧИННИКОВ О.В.	
Оптические свойства коллоидных квантовых точек Ag_2S во внешнем электрическом поле.....	285
КРОЛЬ И.М., БАРИНОВА О.П., ЗЫКОВА М.П.	
Влияние ионов переходных металлов на оптические характеристики цинк боросиликатного стекла эвтектического состава.....	287
СТАМБОЛЯН В.А., АСЕЕВ В.А.	
Исследование влияния добавок на спектры люминесценции в иттербий-эрбиевых германатных стёклах.....	289
ИБРАЕВ Н.Х., СЕЛИВЕРСТОВА Е.В., ИЩЕНКО А.А.	
Плазмонный эффект наночастиц серебра на спектрально-люминесцентные свойства полиметиневых различной ионности.....	291
РУСИНОВ А.П.	
Межфазная тепловая релаксация переходного поглощения электронного газа в плазмонной наночастице.....	293
КУЧЕРЕНКО М.Г., НАЛБАНДЯН В.М.	
Спектры излучения двухчастичного комплекса из квантовой точки и композитной наночастицы с металлическим ядром.....	295
ГОРБАТОВА А.В., БУРЯКОВ А.М., ИВАНОВ М.С., МИШИНА Е.Д., ЛОНГ Ж.	
Нелинейно-оптическая микроскопия молекулярных сегнетоэлектриков.....	297
ПЕНЬКОВ С.А., ПИСКУНОВ А.А.	
Флуоресцентные свойства гетерогенных коллоидных растворов антрацена и серебра.....	299
ХАРИСОВА Р.Д., БАБКИНА А.Н., ЗЫРЯНОВА К.С.	
Исследование люминесцентных свойств перовскитных нанокристаллов CsPbI_3 в борогерманатных стёклах.....	301
МОЛЧАНОВА А.Д., БОЛДЫРЕВ К.Н., БЕЗМАТЕРНЫХ Л.Н.	
Оптическая спектроскопия нелинейного кристалла $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4\text{Mn}$	303
КУЛЬПИНА Е.В., БАБКИНА А.Н., ЗЫРЯНОВА К.С.	
Исследование спектральных свойств ионов Mn^{4+} в щёлочногерманатных стеклокерамиках.....	305
КУЛЬПИНА Е.В., БАБКИНА А.Н., ЗЫРЯНОВА К.С.	
Влияние концентрации марганца на люминесцентные свойства литий-цинк-германатных стеклокерамик.....	307
БУХВОСТОВ А.И., БАБКИНА А.Н., КУЛЬПИНА Е.В., ЗЫРЯНОВА К.С.	
Исследование влияния содержания оксида бора на спектральные свойства щёлочно-алюмооборатных стеклокерамик с хромом.....	309
КУЗЬМИН Н.Н., БОЛДЫРЕВ К.Н., МАЛЫЦЕВ В.В.	
Спектры поглощения тербий-хромового бората со структурой хантита.....	311
ПАВЛЮК А.С., БАБКИНА А.Н.	
Исследование температурной зависимости спектральных свойств нанокристаллов перовскитов CsPbBr_3 в борогерманатном стекле.....	313

ЧЕРНЕЦОВА И.А., КОЛЕСОВА Е.П., ОРЛОВА А.О.

Люминесцентная микроскопия для оценки люминесцентных свойств
полупроводниковых квантовых точек CdSe/ZnS.....315

ГУЩИН С.В., КУЗНЕЦОВ С.В., ЛЯПИН А.А., ПРОЙДАКОВА В.Ю.,
РЯБОЧКИНА П.А., ФЕДОРОВ П.П.

Исследование ап-конверсионной люминесценции порошков $\text{SrF}_2:\text{Er}, \text{Tm}$
при возбуждении лазерным излучением на уровень $^4\text{I}_{13/2}$ ионов Er^{3+}
и уровень $^3\text{F}_4$ ионов Tm^{3+} 317

КАРПАЧ П.В., ВАСИЛЮК Г.Т., АЙТ А.О., БАРАЧЕВСКИЙ В.А.,
МАСКЕВИЧ С.А.

Моделирование параметров фотоуправляемых люминесцентных
наночастиц.....319

САРАТОВСКИЙ А.С., ЕВСТРОПЬЕВ С.К., ВОЛЫНКИН В.М.,
ДУКЕЛЬСКИЙ К.В.

Исследование структуры и спектральных свойств растворов
и композиционных покрытий $\text{Ag}/\text{AgBr}/\text{Zn}(\text{NO}_3)_2/\text{ПВП}$ 321

ГУЩИН М.Г., ВАРТАНЯН Т.А., ОКУНЕВ В.О.
Влияние несовершенства разделительного слоя диэлектрика
на чувствительность газового сенсора на основе многослойных
структур с эффектом плазмон-индуцированной прозрачности.....323

АСТАШКЕВИЧ С.А., КУДРЯВЦЕВ А.А.
Самосогласованное определение параметров Cs-Ag резонансной
фотоплазмы с учётом столкновительного уширения D1 и D2 линий Cs.....325

ХОПЁРСКИЙ А.Н., НАДОЛИНСКИЙ А.М., КОНЕЕВ Р.В.
Эффект анизотропии неупругого расщепления фотона атомным ионом.....327

МАНДУР М.М., АСТАШКЕВИЧ С.А., КУДРЯВЦЕВ А.А.
Изменение знака фотоЭДС фотоэлектрического преобразователя вследствие
конкуренции амбиполярной и свободной диффузии зарядов.....329

КРУПСКАЯ А.Е., ФИЛАТОВ В.В.
Влияние эффекта интерференции состояний на генерацию гравитационных
волн в простейшей бинарной квантовой системе.....331

ХУСЯИНОВ Д.И., ОВЧАРЕНКО С.В., ГУСЬКОВ А.А., БУРЯКОВ А.М.
Усиление терагерцового излучения в структуре WSe_2/FeCo 333

АКМАЛОВ А.Э., КОЗЛОВСКИЙ К.И., КОТКОВСКИЙ Г.Е., КУЗИЩИН Ю.А.,
МАКСИМОВ Е.М., МАРТЫНОВ И.Л., ОСИПОВ Е.В., ПЛЕХАНОВ А.А.,
ЧИСТЯКОВ А.А.

Терагерцовые спектры отражения органических веществ,
расположенных на различных поверхностях.....335

АВДЕЕВ П.Ю., ХУСЯИНОВ Д.И., БУРЯКОВ А.М., БИЛЫК В.Р.
Влияние толщины плёнки FeCo на параметры генерации
терагерцового излучения.....337

ЕПИФАНОВ Е.О., МИНАЕВ Н.В., ЮСУПОВ В.И.
Особенности фокусировки лазерного пучка при абляции
в сверхкритическом CO_2 339

ЖЕЛЕЗНОВ В.Ю., МАЛИНСКИЙ Т.В., РОГАЛИН В.Е. Модернизация аналогового измерителя энергии лазерного излучения ИЛД-2М.....	341
ДЕРМЕНЖИ И.А., БАРЫШНИКОВА С.Ю., КОЧУРОВА Д.Н., КАЛУГИН А.И. Измерение мощности лазерного излучения, отражённого от ламбертова круглого отражателя.....	343
ШУБНЫЙ А.Г., ЕПИФАНОВ Е.О., МИНАЕВ Н.В., ЮСУПОВ В.И. Лазерно-индуцированное жидкостное травление лейкосапфира при повышенном давлении.....	345
БОРОДИНА Л.Н., ВОВК И.А., ПОДГОРНОВ Д.П., СТЕПАНОВА М.С., ЗАХАРОВ В.В., ДУБОВИК А.Ю., ОРЛОВА А.О., ВЕНИАМИНОВ А.В. Лазерная микроскопия магнитолуминесцентных углеродных гетеронаноккомпозитов.....	347
КОВАЛЕНКО М.Н., АЛЕКСЕЕНКО Н.А., МАРКОВА Л.В., РУТКОВСКАЯ Л.С., ЗАЖОГИН А.П. Процессы образования нанопорошков прекурсоров для получения алюминатов меди CuAlO_2 при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на сплавы АД1 и М2 в атмосфере воздуха.....	349
КОВАЛЕНКО М.Н., АЛЕКСЕЕНКО Н.А., МАРКОВА Л.В., РУТКОВСКАЯ Л.С., ПАТАПОВИЧ М.П., ЗАЖОГИН А.П. Процессы образования нанопорошков прекурсоров для получения шпинелей типа CuAl_2O_4 при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на сплавы АД1 и М2 в атмосфере воздуха.....	351
БАЗЗАЛ Х., АЛЕКСЕЕНКО Н.А., ВОРОПАЙ Е.С., КОВАЛЕНКО М.Н., ЧИНЬ Н.Х., ЗАЖОГИН А.П. Исследования процессов образования нанопорошков Al_2O_3 и Al при воздействии расфокусированных сдвоенных лазерных импульсов на алюминий в атмосфере воздуха.....	353
МОРОЗОВА А.А., ЛУТОШИНА Д.С., АНДРЕЕВА Я.М., ОДИНЦОВА Г.В. Повышение износостойкости метода лазерного окрашивания поверхности серебра путём формирования плазмонных наночастиц.....	355
ВЕДЕНИН Е.И., ПРИВАЛОВ В.Е., ШЕМАНИН В.Г. Лазерная система дифференциального ослабления для измерения среднего объёмно-поверхностного диаметра аэрозольных частиц.....	357
БЕЗРУКОВ П.А., СИВАК А.И., НАЩЕКИН А.В., СИДОРОВ А.И., НИКОНОВ Н.В. Определение квантовой эффективности тонких медных и серебряных нанопористых слоёв, полученных реакцией замещения, для фотокаталитического разложения воды.....	359
ВЛАСОВ А.В., ЗАПОТЫЛЬКО Н.Р., КАТКОВ А.А. Сравнение ситалла СО-115М варок 1990-х и 2017-2021 годов для лазерных гироскопов.....	361

ЯКУШЕВ А.И., ЗАПОТЫЛЬКО Н.Р., КАТКОВ А.А., КАЗАНЦЕВА А.Ю. Использование приповов повышенной жёсткости в пьезокорректорах лазерных гироскопов.....	363
ДЬЯЧЕНКО В.В., ПРИВАЛОВ В.Е., ШЕМАНИН В.Г. Моделирование лидарного уравнения для комбинационного рассеяния света молекулами карбонового цикла в атмосфере.....	365
АНДРЕЙЧИКОВ К.С., АСТАХОВ В.П., СОЛОВЬЕВА Г.С., ЧЕКАНОВА Г.В. Стойкий к коротковолновому облучению планарный фотодиодный кристалл из антимонида индия.....	367
АНДРЕЙЧИКОВ К.С., АСТАХОВ В.П., ФАЗИЛОВ Д.Э., ФАЗИЛОВА И.Э., ШАЕВИЧ В.И. Особенности стойкости планарных фотодиодов из антимонида индия к статическому электричеству.....	369
ПАВЛОВ В.И., ХАТЫРЕВ Н.П., КОНДРАТЬЕВ Н.М. Применение лазеров стабилизированных микрорезонаторами для системы лазерного охлаждения рубидиевого фонтана.....	371
ШКУРАТОВА В.А., КОСТЮК Г.К., ПЕТРОВ А.А. Двулучепреломляющие фазовые маски для очертания лазерных пучков.....	373
ГАВРИШ С.В., КИРЕЕВ С.Г., ПУГАЧЕВ Д.Ю., ШАШКОВСКИЙ С.Г. Влияние излучения ксеноновой плазмы на оптическое пропускание кварцевых оболочек импульсных газоразрядных ламп.....	375
ПАВЛОВ В.И., ХАТЫРЕВ Н.П. Перспективы создания аппаратуры для спутникового мониторинга парниковых газов на основе оптических частотных гребенок.....	377
СУДАС Д.П., САВЕЛЬЕВ Е.А., КУЗНЕЦОВ П.И., ГОЛАНТ К.М. Влияние температуры на модулятор добротности на основе Bi_2Te_3 с полимерным покрытием в кольцевом волоконном лазере.....	379
МУРАТОВ Д.А., НИКОЛАЕВ Н.Э., ЧЕХЛОВА Т.К. Оптические свойства композитных сред на основе диоксида титана с золотыми наночастицами.....	381
ШИШКИНА А.С., ЗАКОЛДАЕВ Р.А., АНДРЕЕВА О.В. Прямая лазерная запись субтрактивных треков внутри пористой силикатной матрицы.....	383
ЯНДЫБАЕВА Ю.И., ЗАКОЛДАЕВ Р.А., АНДРЕЕВА О.В. Прямая лазерная запись непроницаемых барьеров в нанопористой силикатной матрице.....	385
ЯКИМУК В.А., АЛСАИФ Я., ЗАКОЛДАЕВ Р.А., АНДРЕЕВА О.В. Прямая лазерная запись одномодовых канальных волноводов в пористой силикатной матрице.....	387
ЯКУНИН В.П., ГРИШАЕВ Р.В., ДЕРЖАВИН С.И., КРАВЧЕНКО Я.В., МАМОНОВ Д.Н. Масштабирование мощности излучения одиночных распределённых квантово-каскадных лазеров с использованием световодов среднего ИК-диапазона на основе халькогенидных стёкол.....	389

ШУЛЬГА А.В., ШИЛОВА И.В. Возбуждение волноводных ТЕ-мод внутрирезонаторным излучением лазера.....	391
ЗУЕВА М.М., НИКОЛАЕВ Н.Э., ЧЕХЛОВА Т.К. Дисперсионные характеристики оптических тонкоплёночных волноводов со ступенчатым профилем показателя преломления.....	393
ГРИШАЕВ Р.В., ЯКУНИН В.П. Термооптические искажения пучков при спектральном суммировании в дисперсионном резонаторе.....	395
АНИКЕЕВА В.Е., БОЛДЫРЕВ К.Н., СЕМЕНОВА О.И., ПОПОВА М.Н. Поляризованные спектры отражения монокристаллов MAPbI_3 в терагерцовом диапазоне.....	397
БИЛЫК В.Р., ОВЧИННИКОВ А.В., ЧЕФОНОВ А.В. Универсальный стенд для генерации широко- и узкополосного терагерцового излучения для исследования индуцированной динамики в твёрдых телах.....	399
КОСТРОМЫКИНА В.В., СКРЫБКИНА А.А., РОГОЖНИКОВ Г.С. Исследование возможности использования пироприёмников терагерцового диапазона для зондирования биологических тканей.....	401
ФИЛИН С.А., РОГАЛИН В.Е., КАПЛУНОВ И.А. Контроль химической чистоты оптической поверхности элементов эллипсометрическим методом.....	403
УКОЛОВ Д.С., БАЛУЕВ А.А., ПЕЧЕНКИН А.А., ЛУКАШИН В.П., ГРОВА П.С. Лазерный сканирующий конфокальный ИК-микроскоп для исследования и неразрушающего контроля полупроводниковых структур и интегральных схем.....	405
СЕКТАРОВ Э.С., СЕДОВ В.С., БОЛДЫРЕВ К.Н. Рентгеновское излучение как способ управления зарядовым состоянием центров окраски в алмазах.....	407
БОЛОШКО А.А., РЫМКЕВИЧ В.С. Влияние шероховатости мишени на лазерно-индуцированную обработку стекла микроплазмой.....	409
ОРЕХОВА Н.А., ПУХТЕЕВ А.О., ХАРИТОНЧИК Р.А., ЗАЖОГИН А.П., ШУНДАЛОВ М.Б. Поиск и идентификация микрометеоритов из хвоста кометы Галлея методом лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии.....	411
АКМАЛОВ А.Э., КОТКОВСКИЙ Г.Е., КУЗИЩИН Ю.А., МАРТЫНОВ И.Л., ОСИПОВ Е.В., ЧИСТЯКОВ А.А., ПОПОВА И.Ю., ТКАЧУК А.П., ВЕРДИЕВ Б.И., АЛАТЫРЕВ А.Г. Спектральное разделение аэрозольных частиц в газовом потоком оптическом цитометре.....	413

ЛЕТУТА С.Н., ДОРОФЕЕВ Д.В., ДОРОШКЕВИЧ А.В., ИШЕМГУЛОВ А.Т., ЦЮРКО Д.Е.	
Наблюдение ударных волн при фотоинактивации бактерий в растворах.....	415
ЛОБАНОВ А.И., КОПЬЕВА М.А., ФИЛАТОВА С.А., ТРИКШЕВ А.И., САДОВНИКОВА Я.Э., КАМЫНИН В.А.	
Разработка универсального оптического стенда для измерения динамики насыщения поглощения оптических поглотителей.....	417
СКРЫБЫКИНА А.А., КОСТРОМЫКИНА В.В., РОГОЖНИКОВ Г.С.	
Исследование рассеяния широкополосного оптического излучения модельными средами в интересах создания комплекса оптической биопсии.....	419
НЕЧИПУРЕНКО Н.И., ПРОКОПЕНКО Т.А., ПАШКОВСКАЯ И.Д., ПАТАПОВИЧ М.П., ЗАЖОГИН А.П.	
Морфологический анализ и ЛАЭМС высохших капель плазмы крови в диагностике пациентов с ТИА головного мозга.....	421
РОГОЖНИКОВ Г.С., ЛЮБЫНСКАЯ Т.Е.	
Регистрация оптических спектров во время процедуры проведения хирургической (кор и аспирационной) биопсии.....	423
ЯМИНСКИЙ И.В., СЕНОТРУСОВА С.А., АХМЕТОВА А.И.	
Оптическая микроскопия нанометрового разрешения с помощью микролинз.....	425
ФЕДОРЦОВ А.Б., СИЛИВАНОВ М.О.	
Использование метода бережного пробуждения светом для управления биоритмами человека.....	427
БОБЕ А.С., КОРЕПАНОВА А.Г., СОЛОВЕЙ А.К., ВОЗНЕСЕНСКАЯ А.О.	
Алгоритм обработки данных оптического датчика пластового флюида.....	429
КАБАНОВА О.С., РУШНОВА И.И., МЕЛЬНИКОВА Е.А., ТОЛСТИК А.Л.	
Дифракционные топологические элементы на основе полимеризуемого жидкого кристалла.....	431
ХОМЧЕНКО А.В., ПРИМАК И.У.	
Измерение двулучепреломления в ЖК-плёнках.....	433
МАХСУДОВ Б.И., ФАЙЗУЛЛОВ И.Х.	
Нелинейные явления при взаимодействии лазерного излучения с композитами на основе полимер – нематический жидкий кристалл при одноосной деформации.....	435
ГАЛУЦКИЙ В.В., КУПЛЕВИЧ М.А., СТРИКИЦА Н.В., СТРОГАНОВА Е.В., ШОСТАК Е.С.	
Исследование слоистых структур на основе LiNbO ₃ методами терагерцовой спектроскопии.....	437
СМИРНОВ М.В., СИДОРОВ Н.В., ПАЛАТНИКОВ М.Н., ПИКУЛЕВ В.Б.	
Влияние двойного легирования Fe и Mg на фотoluminesценцию кристалла ниобата лития.....	439

АНИКЬЕВ А.А., УМАРОВ М.Ф. Комбинационное рассеяние света в кристаллах ниобата лития с дефектами стехиометрии.....	441
ПИКУЛЬ О.Ю., СИДОРОВ Н.В., ТЕПЛЯКОВА Н.А., ПАЛАТНИКОВ М.Н. Лазерная коноскопия крупногабаритных монокристаллов ниобата лития.....	443
АНИКЬЕВ А.А., СИДОРОВ Н.В., УМАРОВ М.Ф. Квазиупругое рассеяние света в конгруэнтных кристаллах ниобата лития.....	445
КОСТРИЦКИЙ С.М., СЕВОСТЬЯНОВ О.Г., ЧИРКОВА И.М., ПАЛАТНИКОВ М.Н. Фоторефрактивный эффект и фотолюминесценция в ниобате лития.....	447
ТИТОВ Р.А., СИДОРОВ Н.В., ПАЛАТНИКОВ М.Н. Влияние комплексообразующей способности B^{3+} на катионный состав системы $Li_2O-Nb_2O_5-B_2O_3$	449
АНИСИМОВ Р.И., КОЛМАКОВ А.А., ТЕМЕРЕВА А.С., ШАРАЕВА А.Е., ШАНДАРОВ С.М., ТИМОФЕЕВ И.В., ПЯТНОВ М.В. Анализ распределения меди в кристаллах $LiNbO_3:Cu$ с поверхностным легированием.....	451
МАКАРЕВИЧ А.В., НАВНЫКО В.Н. Усиление предметной световой волны на отражательных голограммах в кристалле BSO.....	453
ДАВЫДОВСКАЯ В.В., НАВНЫКО В.Н., БУШКО А.А., ВЕЛИЧКО В.А. Выбор оптимальной геометрии распространения и взаимодействия двумерных световых пучков в фоторефрактивном кристалле SBN.....	455
МАКАРЕВИЧ А.В., НИЧИПОРКО С.Ф., НАВНЫКО В.Н., РОПОТ П.И., ШАНДАРОВ С.М. Энергетический обмен световых пучков на смешанных голограммах в кристалле $Bi_{12}TiO_{20}$	457
НАВНЫКО В.Н., МАКАРЕВИЧ А.В., КУЛАК Г.В., ШАНДАРОВ С.М. Влияние оптической активности на обращение волнового фронта в кристаллах $Bi_{12}SiO_{20}$	459
ДЮ В.Г., КИСТЕНЕВА М.Г., ШАНДАРОВ С.М. Влияние засветки непрерывным лазерным излучением на изменения оптического поглощения в кристалле $Bi_{12}TiO_{20}:Ca$	461
УТАМУРАДОВА Ш.Б., МУЗАФАРОВА С.А., АБДУГАФУРОВ А.М. Прозрачные проводящие покрытия на основе оксидов металлов.....	463
КАПЛУНОВ И.А., РОГАЛИН В.Е., КРОПОТОВ Г.И., ШАХМИН А.А., ТРЕТЬЯКОВ С.А. Оптическое пропускание монокристаллов парателлурита.....	465
ТРЕТЬЯКОВ С.А., КАПЛУНОВ И.А., ИВАНОВ А.М., МОЛЧАНОВ С.В., СТЕПАНОВ В.С. Влияние отжига на полированные поверхности монокристаллов парателлурита.....	467

КОТЛИКОВ Е.Н., ЛАВРОВСКАЯ Н.П., ТРОПИН А.Н. Металлодиэлектрические спектроделительные покрытия для инфракрасного диапазона спектра.....	469
ВЕКШИН М.М., НИКИТИН В.А., ЯКОВЕНКО Н.А. Разработка и изготовление интегрально-оптических направленных ответвителей в стекле для длины волны 1,55 мкм.....	471
ЗОЛотовский И.О., ЛАПИН В.А., СЕМЕНЦОВ Д.И. Усиление и компрессия частотно-модулированных импульсов в активном неоднородном световоде.....	473
ДРОЗДОВ И.Р., ОВЧИННИКОВ К.А., БОЙЧУК Е.С., КРИШТОП В.В. Поляризационные взаимодействия световых волн при исследовании двулучепреломляющих волокон методом оптической рефлектометрии в частотной области.....	475
БОГАЧКОВ И.В. Определение частотных характеристик рассеяния Мандельштама – Бриллюэна в различных видах оптических волокон.....	477
ДОРОФЕЕВ В.В., МОТОРИН С.Е., ШАРАФЕЕВ А.Р., КОЛТАШЕВ В.В., ФИРСТОВ С.В. Активированные Er^{3+} и Tm^{3+} высокочистые теллуритные стёкла и волоконные световоды.....	479
БОГАЧКОВ И.В. Оценка влияния продольных растягивающих нагрузок на долговечность оптических волокон.....	481
ИЛЬИНСКИЙ Р.Е. Моделирование пространственного распределения излучения, исходящего от скошенного торца одномодового волокна, методом геометрооптической аналогии.....	483
БОГАЧКОВ И.В. Оценка влияния степени натяжения оптического волокна на показатели надёжности волоконно-оптической линии связи.....	485
АБРАМОВ А.С., ЗОЛотовский И.О., КАМЫНИН В.А., ЛАПИН В.А. Временная компрессия частотно-модулированных импульсов в периодических волоконных световодах.....	487
БОГАЧКОВ И.В. Компенсации влияния температурных изменений при обработке бриллюэновских рефлектограмм оптических волокон.....	489
ПАНЬКОВ А.А. Модальный анализ индикаторных полимерных покрытий со встроенным оптоволоконным PEL-датчиком.....	491
МУРАШКИНА Т.И., ХАСАНШИНА Н.А., БАДЕЕВ В.А., БАДЕЕВА Е.А., ШАЧНЕВА Е.А., КОСТИН Р.В., ДВОРЕЦКИЙ А.Г. Радиационно стойкая волоконно-оптическая система измерения параметров жидкостных потоков.....	493

МУРАШКИНА Т.И., КУКУШКИН А.Н., БАДЕЕВ В.А., ДУДОРОВ Е.А., ТОЛОВА А.А.	
Оценка искровзрывопожаробезопасности волоконно-оптической информационно-измерительной системы.....	495
ПРЖИЯЛКОВСКИЙ Я.В., СТАРОСТИН Н.И., МОРИШНЕВ С.К., САЗОНОВ А.И.	
Волоконный датчик электрического тока с подавлением избыточного шума.....	497
КУКУШКИН А.Н.	
Разработка волоконно-оптического датчика угла наклона.....	499
ТУРОВ А.Т., КОНСТАНТИНОВ Ю.А., БЕЛОКРЫЛОВ М.Е., МАКСИМОВ А.Ю.	
Простой волоконно-оптический распределённый датчик вибраций.....	501
МУРАШКИНА Т.И., ТОЛОВА А.А., КУКУШКИН А.Н., ДУДОРОВ Е.А.	
3D-моделирование волоконно-оптического датчика деформации аттенуаторного типа.....	503
МУРАШКИНА Т.И., КУКУШКИН А.Н., БАДЕЕВ В.А., ТОЛОВА А.А., ПАРШИКОВА Т.В.	
Способ установки волоконно-оптического датчика деформации в угловом стыке сооружения.....	505
ПАНЬКОВ А.А., ПИСАРЕВ П.В.	
Компьютерное моделирование динамического деформирования системы «пластина/датчик»	507
МУРАШКИНА Т.И., БАДЕЕВА Е.А., ПАРШИКОВА Т.В.	
Функция преобразования волоконно-оптического датчика для измерения низкого давления в паренхиматозных органах.....	509
ПОЛЯКОВ А.В., ВОЛЧАНИНА Е.В.	
Спектральные свойства волоконных решёток Брэгга для квазираспределённых измерителей температуры.....	511
БОГАЧКОВ И.В., АГАПИТОВ А.В.	
Изучение распространения оптических волн в многослойных средах.....	513
БОГАЧКОВ И.В., АГАПИТОВ А.В.	
Разработка виртуальной лабораторной работы для изучения отражения и преломления волн на границе раздела сред.....	515
МИНИН И.В., МИНИН О.В.	
Оптические явления в мезоразмерных диэлектрических трёх- и двумерных структурах.....	517
ГОШЕВ А.А., ЕСЕЕВ М.К., МАКАРОВ Д.Н.	
Анализ спектров рассеяния ультракоротких импульсов электромагнитного поля на нанотрубке.....	519
ХАЛЯПИН В.А., БУГАЙ А.Н.	
Об устойчивости оптических пучков, распространяющихся в режиме ионизации.....	521
ЗАХАРОВ И.Н.	
Энергия заряженной частицы в балансно-модулированной электромагнитной волне.....	523

КРАЙСКИЙ А.А., КРАЙСКИЙ А.В. Значительное увеличение амплитуды волновой функции нерелятивистской заряженной частицы, падающей на кристалл при одномерном приближении.....	525
СЕМЕНОВА Л.Е. Резонансное гиперкомбинационное рассеяние света на ТО-фононах в кристалле CdS.....	527
КРАЙСКИЙ А.А., КРАЙСКИЙ А.В. О групповой скорости узкополосного импульса в пределах окна прозрачности возле запрещенной зоны одномерного фотонного кристалла.....	529
ПЕТРОВ Н.И. Распространение поляризованных вихревых пучков света в градиентном нановолокне.....	531
МИНИН И.В., МИНИН О.В. Оптическая ловушка на основе $\pi/2$ сегментированного цилиндра и фотонный крючок в неоднородной (градиентной) среде.....	533
ПЕТРОВ Н.И. Деполаризация вихревых пучков света при распространении в свободном пространстве.....	535
МИНИНА О.В., ГЕЙНЦ Ю.Э., ЗЕМЛЯНОВ А.А. Численное моделирование нелинейного распространения мощных фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе в условиях внешней модуляции фазы волны.....	537
РЕМЗОВ А.Д., САВЕЛЬЕВ М.В. Пространственно-временные характеристики четырёхволнового преобразователя излучения в прозрачной наносuspension с учётом поля тяжести Земли.....	539
ПОЛЕТАЕВ Д.А., СОКОЛЕНКО Б.В. О возможностях применения оптических вихрей для исследования гравитационных туннелей.....	541
ЛУКИН А.В., МЕЛЬНИКОВ А.Н., ПАВЛЫЧЕВА Н.К., ЧЕПЛАКОВ А.Н. Устройство обнаружения электрического разряда с возможностью исследования спектра в ультрафиолетовом диапазоне.....	543
ДЕНИСОВ Д.Г., КАРАСИК В.Е. Анализ когерентных свойств источников оптического излучения, применяемых в оптических технологиях.....	545
МАШКОВЦЕВА Л.С., БОЛОТОВ Д.В., КАЗАНЦЕВ С.Ю., ТЕШАЕВ П.Р., РАБЕНАНДРАСАНА Ж. Источники одиночных фотонов для систем связи с квантовым распределением ключей.....	547
ПЛАТОНОВ Д.Д., БЕЛОВ А.В., ХЫДЫРОВА С., ВАСИЛЬЕВ Д.Д., МОИСЕЕВ К.М. Сравнение квантовой эффективности однофотонного детектора к поляризации фотона в зависимости от геометрии меандра.....	549

ПЛЁНКИН А.П., БРАГИН И.О., ГОМОНОВ Д.Н., СТАТИВКА К.А., ХОМУТОВ А.А.	
Единая система оптической связи для цифрового города.....	551
ЛАВРОВ А.П., ИВАНОВ С.И., КОНДАКОВ Д.В.	
Волоконно-оптическая линия задержки СВЧ-сигналов рециркуляционного типа.....	553
НЕБАВСКИЙ В.А., СТАРИКОВ Р.С., ТРЕТЬЯКОВ Д.А.	
О возможностях анализа нелинейностей сверхвысокочастотных аналоговых оптических трактов по оптическому и радиочастотному спектрам.....	555
КОКЛЮШКИН В.А., ШЕВКУНОВ И.А., БЕЛАШОВ А.В., ЧЕНГ Ч.-Ж., ПЕТРОВ Н.В.	
Исследование сигнала неколлинеарной вырожденной фазовой модуляции в схеме со сфокусированным пучком накачки.....	557
СРЕДИН В.Г., КОНРАДИ Д.С., САХАРОВ М.В.	
Математическое моделирование влияния внеполевой засветки лазерным излучением на матричное фотоприёмное устройство.....	559
АВЛАСЕВИЧ Н.Т., БУТЬ А.И., ЛЯЛИКОВ А.М.	
Повышение чувствительности измерительного контроля оптических элементов с малой клиновидностью подложек.....	561
ДЕНИСОВ Д.Г.	
Спектральный анализ параметров профиля нанометрового уровня крупногабаритных оптических деталей.....	563
ВОЛКОВ В.Г., ГИНДИН П.Д., КАРПОВ В.В., КУЗНЕЦОВ С.А.	
Дневной монокуляр с ночным каналом и с каналом ультрафиолетового диапазона.....	565
ЛЫСОВА Е.М.	
Зеркальный телескоп для кубсат.....	567
ВОЛКОВ В.Г., ГИНДИН П.Д., КАРПОВ В.В., КУЗНЕЦОВ С.А.	
Прицел для охотничьего стрелкового оружия.....	569
ПЕЧИНСКАЯ О.В., ПРОЗОРОВСКАЯ А.А.	
Модификация телеобъектива пирометра спектрального отношения путём коррекции аберраций.....	571
АХМЕТОВ Д.М., МУСЛИМОВ Э.Р.	
Спектрограф с композитной гризмой.....	573
БУСУРИН В.И., МАКАРЕНКОВА Н.А., КОРОБКОВ К.А., БУЛЫЧЁВ Р.П.	
Разработка и исследование прецизионного гравиметра с дифференциальным оптическим считыванием.....	575
КОМАРОВА О.С., ЛЕНТОВСКИЙ В.В., ФЕДОРОВ Д.Л.	
Изучение оптических пеленгаторов в техническом вузе с учётом ретроспективы.....	577
ЦВЕТКОВ М.В., ПАВЛОВ И.Н.	
Использование метода нарушенного полного внутреннего отражения в биосенсоринге.....	579

ИВАНОВ М.А., ИРОШНИКОВ Н.Г., ЛАРИЧЕВ А.В. Исследование влияния астигматизма на детализацию изображений глазного дна.....	581
ИБРАГИМОВА Э.И., ПАВЛОВ И.Н. Программа обработки изображений для оценки эффективности средств защиты органов дыхания оптическим методом.....	583
КОТОВ В.М. Фурье-обработка двумерных изображений с использованием усечённых пространственных фильтров.....	585
БУРМАК Л.И. Акустооптическая фильтрация неколлинеарных интерферирующих световых пучков.....	587
ТЕЛЕШЕВСКИЙ В.И., БУШУЕВ С.В., ГРИШИН С.Г. Акустооптоэлектронное управление фазой в лазерной интерферометрии.....	589
РОДИН И.Р., ПАВЛОВ И.Н. Визуализация звукового поля в жидкости с помощью лазерной плоскости.....	591
ФИЛАТОВ А.Л., МАРКОВ А.П., ЮРКОВА А.Н. Нейросеть для локализации изображений молнии на полученных с геостационарной орбиты снимках.....	593
КУЛАКОВ М.Н., СТАРИКОВ Р.С., ЧЕРЁМХИН П.А. Влияние прореженности объекта на качество его восстановления при однопиксельном детектировании.....	595
ДЕНИСОВ Д.Г. Анализ возможности минимизации контраста спекл-структуры в методе динамической интерферометрии.....	597
МАКСИМОВА Л.А., МЫСИНА Н.Ю., ПАТРУШЕВ Б.А. Моделирование процессов формирования измерительного сигнала в лазерном спекл-интерферометре поперечных микросмещений с гауссовыми освещающими пучками.....	599
ПАВЛОВ П.В., АРТАНОВ В.В., СТЕПАНОВ А.Р. Определение внутренних дефектов в элементах конструкции кабин самолётов методом спекл-структур оптического излучения.....	601
ПАТРУШЕВ Б.А., МАКСИМОВА Л.А., РЯБУХО В.П. Спекл-интерферометр тангенциальных смещений рассеивающего объекта при освещении одним лазерным пучком.....	603
ЦАРЕВА А.М., ШАКИРОВ Н.И., ЦАРЕВА К.А., ЗАРИПОВ М.Р., МАКАЕВА Р.Х. Голографическая интерферометрия при визуализации сложных колебаний диска компрессора.....	605
ЗАГОРУЛЬКО К.А., КОЗЛОВ А.В., ХАТЫРЕВ Н.П. Измерения фазовых шумов узкополосных лазеров.....	607
ЯКУШЕНКОВ П.О. Исследование синхронизации мод лазера с диодной накачкой для генератора несущей в фотонных схемах.....	609

КУЗЬМИН М.С., РОГОВ С.А.	
Ввод низкочастотных сигналов в оптические системы обработки информации с жидкокристаллической матрицей на входе.....	611
МИНИХАНОВ Т.З., ЗЛОКАЗОВ Е.Ю., КРАСНОВ В.В., ДЕРЕВЕНИЦКАЯ Д.Д.	
Исследование временной динамики модуляции фазы ЖК ПВМС HoloEye PLUTO 2 VIS-016.....	613
ДЕРЕВЕНИЦКАЯ Д.Д., КРАСНОВ В.В., ЗЛОКАЗОВ Е.Ю., МИНИХАНОВ Т.З.	
Оптический синтез фазовых бинарных дифракционных элементов без несущей пространственной частоты.....	615
ХАРИТОНОВ Д.Ю., МУСЛИМОВ Э.Р.	
Моделирование голограммной дифракционной решётки второго поколения.....	617
ИСМАНОВ Ю.Х., ТЫНЫШОВА Т.Д.	
Влияние фазового объекта с изменяющимся показателем преломления на положение плоскостей саморепродукции решётки.....	619
АВЛАСЕВИЧ Н.Т., ЛЯЛИКОВ А.М.	
Формирование голограмм периодических структур в некогерентном свете с использованием опорных решёток.....	621
ИСМАНОВ Ю.Х., ДЖАМАНКЫЗОВ Н.К., АЛЫМКУЛОВ С.А.	
Особенности записи и восстановления голограммы-решётки.....	623
АВЛАСЕВИЧ Н.Т., ЛЯЛИКОВ А.М.	
Устройство записи голограмм периодических структур в пространственно-некогерентном свете с произвольной ориентацией полос структуры.....	625
ГАНЖЕРЛИ Н.М., ГУЛЯЕВ С.Н., МАУРЕР И.А.	
Высокочастотные голографические решётки на бихромированном желатине.....	627
МОГИЛЬНЫЙ В.В., СТАНКЕВИЧ А.И., ХРАМЦОВ Э.А., ШКАДАРЕВИЧ А.П.	
Фоторефрактивный и рельефообразующий голографический материал.....	629
ГАНЖЕРЛИ Н.М., ГУЛЯЕВ С.Н., МАУРЕР И.А., АРХИПОВ А.В.	
Нестандартный метод обработки фотоматериала ПФГ-04 для голографии....	631
ДОЛГИРЕВ В.О., ШАРАНГОВИЧ С.Н.	
Экспериментальное исследование голографического формирования мультиплексированных многослойных неоднородных дифракционных структур в фотополимеризующихся композициях.....	633
БЫКОВСКИЙ А.Ю., ВАСИЛЬЕВ Н.А.	
Многозначно-логическая модель доверия для агентов, управляемых по оптической сети.....	635
ПАВЛОВ А.В., ГАУГЕЛЬ А.О.	
Подход к аппроксимации пространственно-частотных спектров изображений применительно к схеме голографии Фурье.....	637
ГАРНАЕВА Г.И., НЕФЕДЬЕВ Л.А., НИЗАМОВА Э.И.	
Логические операции с изображениями при использовании эффектов записи и стирания информации.....	639

ИСМАНОВ Ю.Х., АЛЫМКУЛОВ С.А., ДЖАМАНКЫЗОВ Н.К., ЖУМАЛИЕВ К.М.	
Потеря информации в голографических системах.....	641
НИЗАМОВА Э.И., НЕФЕДЬЕВ Л.А., ГАРНАЕВА Г.И.	
Поляризационное управление сигналами в аккумулярованной стимулированной эхо-голограмме.....	643
ЕЗЕРСКИЙ А.С., ГЕОРГИЕВА А.О., ЧЕРНЫХ А.В., ПЕТРОВ Н.В.	
Голографическая система регистрации на основе эффекта геометрической фазы в задаче исследования качества волнового фронта при модуляции цифровым микрозеркальным устройством.....	645
СВИСТУНОВ А.С., РЫМОВ Д.А., ЧЕРЁМХИН П.А., ЯРОВОЙ И.Ю.	
Реконструкция сечений 3D-сцены из набора цифровых голограмм машинным обучением.....	647
ОВЧИННИКОВ А.С., КРАСНОВ В.В., КУРБАТОВА Е.А.	
Исследование методов бинаризации амплитудных дифракционных оптических элементов без несущей пространственной частоты.....	649
КОЗЛОВ А.В., РОДИН В.Г., ЧЕРЁМХИН П.А.	
Подавление шума в цифровой голографии фильтрацией с интерполяцией....	651
ЕВТИХИЕВ Н.Н., КРАСНОВ В.В., МОЛОДЦОВ Д.А., РОДИН В.Г., ЧЕРЁМХИН П.А., СТАРИКОВ Р.С.	
Некогерентный коррелятор с использованием голографического фильтра, синтезированного с применением преобразования Хартли.....	653
Именной указатель авторов.....	655

В.П. ДРАЧЕВ

Сколковский институт науки и технологий

ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОНЫ В ОБЪЁМЕ ГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ СРЕД

Обсуждаются свойства объёмных плазмон-поляритонов в гиперболических метаматериалах и их применения для суб-дифракционной фотолитографии и плоских линз.

V.P. DRACHEV

Skolkovo Institute of Science and Technology

VOLUME PLASMON-POLARITONS IN HYPERBOLIC MEDIA

We discuss properties of volume plasmon-polaritons in hyperbolic metamaterials and applications for sub-diffraction photolithography and flat lenses.

Оптические метаматериалы с гиперболической дисперсией обеспечивают множество применений, включая перенос изображения субволнового размера в дальнее поле, нано-фотолитографию и увеличение радиационной константы излучателей за счёт эффекта Парселла. Волновой вектор плоской волны в этих средах следует по поверхности гиперboloида в отличие от эллипсоида для обычного анизотропного диэлектрика. Последствия *гиперболической дисперсии* были впервые изучены в 50-х годах в связи с проблемами распространения электромагнитных волн в ионосфере Земли и в слоистых искусственных материалах линий связи. Последние годы привели к росту работ по применению гиперболических сред на основе метаматериалов в оптике и фотонике во всём оптическом спектре (см. обзор [1]).

Внутри гиперболической среды главные компоненты тензора диэлектрической проницаемости имеют противоположные знаки, заставляющие среду проявлять «металлический» тип отклика на световые волны в одном направлении и «диэлектрический» отклик в другом. Наши исследования [2] показывают, что внутри гиперболических сред *объёмные плазмон-поляритоны* (ОПП) распространяются вдоль характерных направлений, хотя и пересекают границы составляющих материалов. ОПП образуют локализованные, зависящие от направления оптические отклики. Это очень похоже на распространение обычных *поверхностных*

плазмон-поляритонов (ППП) вдоль плоских границ, разделяющих изотропные диэлектрики и металлические материалы.

Принципиальная схема экспериментов включает освещение двойной щели, фрезерованной в хромовой плёнке пучком Ga. Изображение двойной щели с серебряно-кремнеземистой слоистой пластиной гиперболического метаматериала (ГММ), контактирующей со слоем фоторезиста. Результаты переноса изображения двойной щели ГММ сравниваются с эталонной пластиной кремнезема, контактирующей со слоем фоторезиста. Суб-дифракционное изображение в фоторезисте измерялось атомно-силовым микроскопом (АСМ). Профили глубины, получены АСМ-сканированием в фоторезисте для серебристо-кремнеземистого пластинчатого образца ГММ, имеющего три различные глубины в зависимости от времени воздействия излучения. Фактическая глубина для образца слоя кремнезёма составляет 112 нм.

ТМ-поляризация объёмного плазмон-поляритона в одноосной среде $\varepsilon = \text{diag}(\varepsilon_o, \varepsilon_o, \varepsilon_e)$ распространяется вдоль резонансного конуса, между направлениями с $\text{Re}\varepsilon(\theta_e) > 0$ и $\text{Re}\varepsilon(\theta_e) < 0$. Двухщелевая схема Юнга используется для изучения пространственно-ограниченной дифракции в гиперболической пластине, состоящей из множества тонких плоских слоёв металла и диэлектрика, для получения интерференционной картины субдифракционного ОПП на выходной границе пластины и резиста. Эксперименты демонстрируют применимость таких систем в нанолитографии.

АСМ-сканы усреднялись по щелям для серебристо-кремнеземистого пластинчатого образца ММ, отложенного в течение разного времени от 8 до 10 минут. Когда глубина профиля в фоторезисторе составляет 15 нм, полная ширина на полувысоте (ПШП) составляет 83 нм. Более длительное время экспозиции привело к более глубокому и более широкому профилю. Таким образом, для глубины записи 35 и 42 нм значения ПШП составляют 105 и 135 нм соответственно. Наши результаты указывают на то, что плоские металлдиэлектрические пластинчатые структуры способны формировать субволновое интерференционное пятно от дифракции на двух щелях. По мере увеличения глубины проникновения (времени экспозиции) контрастность становится лучше, а ПШП становится больше. Если бы экспериментальный профиль был экстраполирован на ещё меньшую глубину, боковые пики увеличились бы, а центральный пик стал бы уже, приближаясь к моделируемой интенсивности излучения вблизи поверхности сопротивления. ПШП центральных пиков структуры ГММ и

одного слоя составляют 45 и 514 нм соответственно. Таким образом, результаты численного моделирования хорошо согласуются с нашими экспериментальными результатами.

Авторами [3] показано, что система из двух разных гиперболических сред может быть использована как плоская линза для прямого переноса изображения в видимом диапазоне спектра. Предложенная линза состоит из двух анизотропных фотонных кристаллов: металлодиэлектрический многослойный и проволоочный метаматериал. Аналитические и численные расчёты показывают, что излучение точечного диполя, расположенного на поверхности линзы, распространяется вдоль узкого конуса вдоль направления n , где $\text{Re}\varepsilon(\omega, n) = 0$. Формирование изображения происходит благодаря отрицательной рефракции на границе двух частей линзы. Относительно высокая прозрачность линзы (13 %) достигается согласованием импедансов двух частей. На внешней поверхности линзы формируется изображение размером 50 нм при длине волны излучения $\lambda = 670$ нм.

Список литературы

1. Drachev V.P., Podolskiy V.A., Kildishev A.V. Hyperbolic metamaterials: new physics behind a classical problem // Optics Express. 2013. V. 21(12). P. 15048.
2. Ishii S., Kildishev A.V., Narimanov E., Shalaev V.M., Drachev V.P. Subwavelength diffraction pattern from volume plasmon polariton in a hyperbolic medium // Laser Photonics Review. 2013. V. 7(2). P. 265-271.
3. Bronnikov K., Arriaga J., Krokhin A., Drachev V.P. Sub-diffraction-limit imaging system with two interfacing hyperbolic metamaterials // Physical Review. 2021. V. 16 (4). P. 044054.

В.Я. ШУР, А.Р. АХМАТХАНОВ, А.А. ЕСИН, М.А. ЧУВАКОВА,
Д.Б. КОЛКЕР¹, А.А. БОЙКО¹, В.С. ПАВЕЛЬЕВ²

Уральский федеральный университет, Екатеринбург

¹*Новосибирский государственный университет*

²*Самарский национальный исследовательский университет*

им. акад. С.П. Королева

ПЕРИОДИЧЕСКИ ПОЛЯРИЗОВАННЫЕ КРИСТАЛЛЫ И ТОНКИЕ ПЛЁНКИ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЧАСТОТЫ СВЕТА И ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Представлены последние достижения в области создания прецизионных стабильных доменных структур в монокристаллах и тонких плёнках сегнетоэлектриков: ниобата лития, танталата лития и титанил-фосфата калия, для реализации параметрической генерации света и генерации второй гармоники. Также приведены результаты по созданию управляемых дифракционных оптических элементов на основе ниобата лития со стабильной доменной структурой для управления когерентным излучением.

V.Ya. SHUR, A.R. AKHMATKHANOV, A.A. ESIN,
M.A. CHUVAKOVA, D.B. KOLKER¹, A.A. BOYKO¹, V.S. PAVELYEV²

Ural Federal University, Ekaterinburg

¹*Novosibirsk State University*

²*Samara National Research University*

PERIODICALLY POLED FERROELECTRIC CRYSTALS AND THIN FILMS FOR LIGHT FREQUENCY CONVERSION AND DIFFRACTION OPTICAL ELEMENTS

We present the recent achievements in periodical poling in single crystals and thin films of lithium niobate, lithium tantalate and potassium titanyl phosphate for realization of the optical parametric oscillation and second harmonic generation. We present also the creation of diffraction optical elements based on lithium niobate with stable domain patterns for control of coherent light.

Сегнетоэлектрические кристаллы с прецизионными регулярными доменными структурами (РДС) с воспроизводимостью периода до 10 нм используются для нелинейно-оптических преобразований частоты лазерного излучения, включающих генерацию второй гармоники (ГВГ) и параметрическую генерацию света (ПГС), за счёт реализации в них

условий фазового квазисинхронизма. Для создания прецизионных РДС необходимо детальное исследование эволюции сегнетоэлектрической доменной структуры в электрическом поле. Исследовано формирование самоорганизованных полосовых доменных структур в ниобате лития с поверхностным диэлектрическим слоем на полярной поверхности. При создании слоя методом мягкого протонного обмена и при нанесении слоя оксида кремния обнаружено формирование и анизотропный рост полосовых доменов субмикронной ширины. Длина полосовых доменов составляет десятки микрон. Изменение поля и толщины диэлектрического зазора позволяет изменять период структуры от 200 нм до 1 мкм и ширину полосовых доменов от 80 до 400 нм.

Проведено детальное исследование эволюции доменной структуры и возможностей создания РДС в новом классе материалов – тонких монокристаллических плёнках ниобата лития на изолирующем слое SiO_2 (LNOI). Исключительный интерес к LNOI обусловлен возможностью применения в устройствах квантовой фотоники и нелинейной оптики. Переключение поляризации осуществлялось с помощью проводящего зонда сканирующего зондового микроскопа. Продemonстрирована возможность создания РДС с периодом менее 200 нм [1, 2].

Создание веерных доменных структур в монокристаллах MgO:LN толщиной 1 мм позволило получить ПГС с широкой перестройкой холостой волны в диапазоне от 2,5 до 4,5 мкм при накачке лазером 1,053 мкм. В кристаллах титанил-фосфата калия (КТР) создана РДС с периодом 40 мкм для реализации ПГС с холостой волной 2,4 мкм.

Сегнетоэлектрические домены с различным направлением спонтанной поляризации обладают также различным знаком электрооптических коэффициентов, что позволяет создавать на их основе перестраиваемые дифракционные оптические элементы (ДООЭ) [3]. Продemonстрирована возможность непрерывного управления дифракционной эффективностью ДООЭ. Показано, что время оклика ДООЭ составляет менее 0,1 мс. На основе кристаллов ниобата лития со стабильной доменной структурой сложной геометрии изготовлены ДООЭ для управления модовым составом излучения, которые позволяют формировать моду Гаусса-Эрмита (1,0), а также в моду с орбитальным угловым моментом при освещении гауссовым пучком.

Список литературы

1. Slautin B.N., Zhu H., Shur V.Ya. // *Ceramics International*. 2021. V. 47. P. 32900.
2. Slautin B.N., Zhu H., Shur V.Ya. // *Ferroelectrics*. 2021. V. 576. P. 119.
3. Esin A.A., Akhmatkhanov A.R., Pavelyev V.S., Shur V.Ya. // *Computer Optics*. 2021. V. 45(2). P. 222.

И.М. ФРАДКИН^{1,2}, С.А. ДЬЯКОВ¹, Н.А. ГИППИУС¹¹*Сколковский институт науки и технологий*²*Московский физико-технический институт**(национальный исследовательский университет), Долгопрудный*

ГОМОГЕНИЗАЦИЯ МИ-РЕЗОНАНСНЫХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ

Периодически модулированные оптические среды в пределе большой длины волны света можно рассматривать как искусственные материалы или метаматериалы. В отличие от природных материалов специально спроектированные метаматериалы часто демонстрируют значительную пространственную дисперсию, что существенно расширяет область возможных применений. В этой работе мы демонстрируем вычислительный подход гомогенизации фотонных кристаллов, основанный на возбуждении вынужденных электромагнитных колебаний инжектируемым током. В отличие от многих других техник вычисления эффективных материальных параметров, наш метод легок в реализации, позволяет оценить область применимости модели эффективной среды и имеет потенциал развития для учёта эффектов сильной пространственной дисперсии.

I.M. FRADKIN^{1,2}, S.A. DYAKOV¹, N.A. GIPPIUS¹¹*Skolkovo Institute of Science and Technology*²*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny*

HOMOGENIZATION OF MIE-RESONANT METAMATERIALS

Periodically modulated optical media in the long wavelength limit of light can be regarded as artificial materials or metamaterials. Unlike natural materials, specially designed metamaterials often exhibit significant spatial dispersion, which strongly expands the range of possible applications. In this work, we demonstrate a computational approach for homogenization of photonic crystals based on the excitation of forced electromagnetic oscillations by the injected current. Unlike many other techniques for calculating effective material parameters, our method is easy to implement, allows one to estimate the range of applicability of the effective medium approximation, and has the potential for development to take into account the effects of strong spatial dispersion.

Оптические метаматериалы привлекают большое внимание исследователей уже в течение последних двадцати лет. Действительно, идея реализации искусственных метаматериалов при помощи плотных фотонных кристаллов потенциально позволяет получить совершенно разные оптические свойства по запросу. Наибольшие ожидания в этой области были изначально связаны с разработкой метаматериалов,

обеспечивающих недостижимые в природных материалах свойства. Огромные усилия были приложены для создания мантии-невидимки, гиперболических метаматериалов [1, 2], левых материалов [3] и многих других интересных структур. К сожалению, большинство этих амбициозных проектов требуют использования плазмонных материалов, которые на практике значительно ухудшают теоретически предсказанные эффекты из-за Джоулевых потерь. Тем не менее, и сейчас существует огромное количество *перспективных* структур, которые ещё только предстоит детально изучить. К ним относятся, например, полностью диэлектрические метаматериалы, поддерживающие резонансы Ми.

По этой причине существует большая потребность в универсальном и надёжном вычислительном подходе, который можно было бы применить или естественным образом расширить для любого сложного метаматериала. Такой подход должен быть основан на микроскопическом рассмотрении гомогенизированного фотонного кристалла, обеспечивать как расчёт дисперсии волн в объёмной среде, так и соответствующие граничные условия, обладать чётким критерием его применимости. К сожалению, не все существующие подходы удовлетворяют этим требованиям. Наиболее популярные феноменологические подходы, такие как подход Николсона-Росса-Вейра, часто ошибочно применяются к неподходящим системам, что приводит к нефизическим и неверным результатам. Аналитические подходы в духе модели Максвелла-Гарнетта ограничены электростатическими или магнитостатическими пределами. Методы гомогенизации, основанные на представлении связи мета-атомов в виде разложения по мультипольным моментам, резко усложняются с увеличением числа мультиполей.

В этой работе, мы развиваем микроскопический теоретический подход для расчёта материальных параметров искусственных кристаллов. Мы предлагаем формально рассматривать возбуждение бесконечного метаматериала так же, как рассеяние света на отдельных частицах. Это позволяет нам переформулировать возбуждение бесконечного метаматериала плоской волной в терминах задачи излучения некоторого тока, и соответственно получить отклик рассматриваемой структуры как функцию поляризации и, что наиболее важно, независимых частоты ω и волнового вектора k . Эти данные позволяют не только извлечь параметры материала, но и оценить область их достоверности.

Список литературы

1. Drachev V.P., Podolskiy V.A., Kildishev A.V. // Opt. Express. 2013. V. 21. № 12. P. 15048.
2. Krokhin A.A., et al. // Phys. Rev. B. 2016. V. 93. № 7. P. 075418.
3. Veselago V.G. // Physics-Uspkhi. 1968. V. 10. № 4. P. 509-514.

Д.А. ЗИМНЯКОВ^{1,2}, С.С. ВОЛЧКОВ¹, Л.А. КОЧКУРОВ¹,
А.Ф. ДОРОГОВ¹, Д.В. ЦЫПИН¹

¹*Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина*

²*Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов*

ИНДУЦИРОВАННАЯ ФЛЮОРЕСЦЕНЦИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ НАКАЧКЕ СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ КОГЕРЕНТНОСТЬЮ ИЗЛУЧЕНИЯ НАКАЧКИ

Представлены результаты исследований спектральных свойств флуоресцентного отклика многократно рассеивающих случайно-неоднородных сред с флуоресцирующими компонентами при лазерной накачке в полосе поглощения флуорофора. Установлено, что наблюдаемый в экспериментах по возбуждению стохастической лазерной генерации в подобных системах эффект насыщения спектральных свойств флуоресценции (спектрального качества и β - фактора) при возрастании интенсивности накачки и уменьшении транспортной длины распространения излучения в среде обусловлен гранулированной структурой поля накачки в среде вследствие когерентности излучения накачки.

D.A. ZIMNYAKOV^{1,2}, S.S. VOLCHKOV¹, L.A. KOCHKUROV¹,
A.F. DOROGOV¹, D.V. TSYIPIN¹

¹*Yury Gagarin State Technical University of Saratov*

²*Institute of Precision Mechanics and Control of the RAS, Saratov*

STIMULATED FLUORESCENCE UNDER LASER PUMPING OF RANDOM MEDIA: FUNDAMENTAL LIMITATIONS DUE TO COHERENCE OF A PUMPING LIGHT

The results of studies of the spectral properties of fluorescence response from multiple scattering random media with fluorescent components under pulsed-periodic laser pumping in the absorption band of a fluorophore are presented. It was established that the previously observed effect of saturation of the spectral properties of fluorescence response (spectral quality and β - factor) in these systems with an increase in the pump intensity and a decrease in the transport mean free path of light propagation is due to the granular structure of the pump field due to coherence of a pump radiation.

Эффект значительного сужения спектра флуоресцентного отклика накачиваемых импульсным лазерным излучением флуоресцирующих случайно-неоднородных сред вблизи некоторого порогового значения

интенсивности накачки обычно интерпретируется как переход от спонтанной флуоресценции в накачиваемой среде к режиму стохастической лазерной генерации (random lasing) [1, 2]. Для многократно рассеивающих систем типа «рассеивающая матрица – лазерный краситель» характерны относительно малые значения фактора спектрального качества $Q_\lambda = \bar{\lambda}/\Delta\lambda$ и большие значения β -фактора [3] флуоресценции, незначительно изменяющиеся в широком интервале значений интенсивности выше порога стохастической лазерной генерации. Соответственно, вклад индуцированной составляющей флуоресценции во флуоресцентный отклик накачиваемой среды выше порога существенно ограничен. Подобные фундаментальные ограничения спектральных свойств флуоресцентного отклика случайно-неоднородных сред при высоких интенсивностях накачки предположительно обусловлены эффектом спекл-модуляции частично когерентного светового поля накачки [4]. С целью интерпретации этих особенностей проведены экспериментальные исследования флуоресцентного отклика суспензий наночастиц диоксида титана в водных растворах родамина 6Ж при изменениях транспортной длины распространения излучения накачки в суспензиях от сотен до единиц микрометров и интенсивности лазерной накачки на длине волны 532 нм в широких пределах. На основе анализа полученных экспериментальных данных и результатов теоретического моделирования кинетики флуоресцентного отклика стохастических ансамблей ассоциируемых со спеклами локальных эмиттеров флуоресценции установлена фундаментальная взаимосвязь между предельными значениями параметров флуоресцентного отклика (фактора спектрального качества, β -фактора, доли индуцированной составляющей) и характеристиками объёмного спекл-поля, формируемого в среде при накачке. Дана интерпретация наблюдаемого в экспериментах смещения в коротковолновую область спектрального максимума индуцированной составляющей флуоресцентного отклика относительно максимума спонтанной составляющей.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-29-00612, <https://rscf.ru/project/22-29-00612/>.

Список литературы

1. Noginov M.A. Solid-State Random Lasers. Springer, 2005.
2. García-Revilla S., Fernández J., Illarramendi M.A., et. al. // Opt. Express. 2008. V. 16 (16). P. 12251.
3. Van Soest G., Legendijk A. // Phys. Rev. E. 2002. V. 65 (4). P. 047601.
4. Zimnyakov D.A. et. al. // Opt. Express. 2021. V. 29(2). P. 2309.

И.Р. ГАБИТОВ^{1,2}, Д. ГИБНИ¹, И.А. КУК²

¹Университет Аризоны Тусон, США

²Сколковский институт науки и технологий

МЕТОДЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ В КОГЕРЕНТНЫХ СИСТЕМАХ С НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ

Теоретически исследованы методы расширения принципов когерентной телекоммуникации на случай сильной нелинейности. Основу рассмотренных подходов представляет интегрируемость модельных уравнений и, как следствие, линейный характер эволюции коэффициента рассеяния ассоциированной спектральной задачи для оператора Лакса. В нелинейных когерентных системах вместо выходного оптического сигнала в качестве объекта цифровой обработки «распространение назад» предлагается использовать соответствующий коэффициент рассеяния. Для решения обратной задачи восстановления входного сигнала по коэффициенту рассеяния использованы методы машинного обучения.

I.R. GABITOV^{1,2}, J. GIBNEY¹, I.A. KUK¹

¹University of Arizona, Tucson, USA

²Skolkovo Institute of Science and Technology

MACHINE LEARNING AND INFORMATION TRANSMISSION IN NONLINEAR COHERENT SYSTEMS

Methods for extending the principles of coherent telecommunications to the case of strong nonlinearity are theoretically investigated. The considered approaches are based on the integrability of model equations and, as a consequence, on the linear character of the evolution of the scattering coefficient of the associated spectral problem for the Lax operator. In nonlinear coherent systems, it is proposed to use the scattering coefficient as an object for digital "back propagation" instead of the corresponding output optical signal. Machine learning algorithms are used to solve the inverse problem for recovering the input signal from the scattering coefficient.

Когерентные методы передачи информации в волоконно-оптических системах являются основой современной высокоскоростной телекоммуникации [1]. Основным фактором, сдерживающим дальнейший прогресс в этой области, является линейный режим распространения оптических импульсов, лежащий в основе данного подхода. Для компенсации нелинейных искажений в настоящее время предлагается широкий спектр различных методов от цифрового «распространения назад» используя модельные нелинейные уравнения [2] до применения их

свойств интегрируемости [3, 4]. Подход, рассматриваемый в данной работе, также основан на интегрируемости модельного уравнения – Нелинейного уравнения Шредингера (НУШ) [3]:

$$iE_z + \frac{1}{2}E_{tt} + |E|^2 E = 0, \quad E(t, z) \rightarrow 0, \quad t \rightarrow \pm\infty, \quad E_0(t) = E(t, 0).$$

Здесь E , z и t безразмерные электрическое поле, пространственная координата и время в “бегущей” системе координат соответственно; $E_0(t)$ – заданная функция, представляющая собой последовательность импульсов на входе системы. Данное уравнение представляет собой результат усреднения по расстоянию между оптическими усилителями, компенсирующими потери в оптических волокнах. НУШ соответствует система матричных уравнений известная как пара Лакса [3]:

$$\begin{cases} \Psi_t = U\Psi, U = i(-\lambda I + H) \\ \Psi_z = V\Psi, V = i(\lambda^2 I + \lambda H + W) \end{cases}$$

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad H = i \begin{bmatrix} 0 & E(t, z) \\ -E^*(t, z) & 0 \end{bmatrix}, \quad W = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} |E(t, z)|^2 & -E_t(t, z) \\ -E_t^*(t, z) & -|E(t, z)|^2 \end{bmatrix},$$

где λ – комплексный параметр. Условием совместности данной системы является НУШ [3]. Первое уравнение пары Лакса представляет собой спектральную задачу, потенциал которой задаётся решением НУШ. Определим два фундаментальных решения $\chi^+(t, z)$ и $\chi^-(t, z)$ уравнения $\Psi_t = i(-\lambda I + H)\Psi$, задаваемых асимптотическим поведением на бесконечности $\chi^\pm(t, z) \rightarrow e^{-i\lambda t}$, $t \rightarrow \pm\infty$. Каждое фундаментальное решение представляет собой базис краевой задачи, что позволяет представить $\chi^-(t, z)$ как разложение по базису $\chi^+(t, z)$, $\chi^-(t, z) = \chi^+(t, z) S(z, \lambda)$. Матрица коэффициентов разложения $S(z, \lambda) = \begin{bmatrix} a & -b^* \\ b & a^* \end{bmatrix}$ представляют собой матрицу

рассеяния. Отношение $c(z, \lambda) = b^*/a$ является коэффициентом рассеяния. Известно [3] что коэффициент рассеяния подчиняется линейному уравнению $c_z + 2i\lambda^2 c = 0$, которое представляет собой фурье-преобразование линейного уравнения Шредингера. Для обобщения принципа когерентной связи на нелинейный случай предлагается следующая схема: 1) на выходе системы $z = L$ стандартным образом производится измерение сигнала, для которого решается прямая задача рассеяния, и находится коэффициент рассеяния $c(L, \lambda)$; 2) используя стандартный метод цифрового “распространения назад” находится значение коэффициента рассеяния при $z = 0$, $c_0(\lambda) = c(0, \lambda)$; 3) на основе

найденного значения коэффициента рассеяния $c_0(\lambda)$ решается обратная задача по нахождению потенциала $E_0(t)$ соответствующего исходной последовательности битов. Обратная задача рассеяния может быть решена с использованием системы линейных интегральных уравнений Гельфанда-Левитана-Марченко либо методом задачи Римана [3]. В данной работе используются алгоритмы машинного обучения.

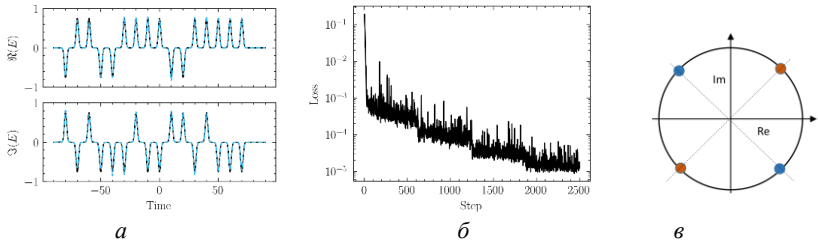


Рис. 1. Валидация нейронной сети на тестовом наборе данных: сплошная линия – передаваемый сигнал (цель), пунктирная линия – предсказание модели (а), зависимость среднеквадратической ошибки от шага обучения (б), диаграмма, иллюстрирующая соответствующее QDPSK кодирование [1] (в)

Для решения обратной задачи рассеяния была использована нейронная сеть (НС), состоящая из двух последовательных полносвязных слоёв, функции активации не использовались. В качестве функции потерь была выбрана среднеквадратичная ошибка, эволюция функции потерь в процессе обучения показана на рис. 1б. На вход НС в процессе обучения подаются коэффициенты отражения, соответствующие последовательностям гауссовых импульсов со случайным знаком перед амплитудой (см. рис. 1а). Набор данных для тестирования модели состоит из других случайных реализаций последовательностей такой же формы, однако коэффициент отражения в этом случае посчитан в точке $z = L = 10$, в соответствии с решением НУШ, что составляет 10 нелинейных длин, затем к данным рассеяния была применена процедура “распространения назад”, после чего они подавались на обученную НС.

Показано что сочетание метода обратной задачи рассеяния и машинного обучения является эффективным способом восстановления оптического сигнала, подвергнувшегося сильным нелинейным искажениям.

Список литературы

1. Kikuchi K., J. Light. Technol. 2016. V. 34. P. 157-179.
2. Fan Qirui, et al. // Nature Communications. 2020. V. 11. No. 1. P. 1-11.
3. Захаров В.Е., Манаков С.В., Новиков С.П., Питаевский Л.П. Теория солитонов: метод обратной задачи. М.: Наука, 1980.
4. Prilepsky J.E., et al. // Physical review letters. 2014. V. 113. No. 1. P. 013901.

В.Я. КАТКОВНИК, И.А. ШЕВКУНОВ, К.О. ЕГИЗАРЯН

Университет Тампере, Финляндия

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОДИРУЮЩИХ ДИФРАКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В этой работе мы предлагаем гибридную систему формирования изображений, которая оптимально уравнивает оптическую силу между преломляющей линзой и дифракционные оптические элементы для ахроматической визуализации с увеличенной глубиной резкости. Для оптимизации оптических элементов, мы рассматриваем полностью дифференцируемую модель формирования изображения, чтобы совместно находить параметры оптики и процедуры визуализации для вычислительных камер посредством сквозной оптимизации с нейронными сетями.

V.Ya. KATKOVNIK, I.A. SHEVKUNOV, K.O. EGIAZARIAN

Tampere University, Finland

COMPUTATIONAL IMAGING WITH ENCODED DIFFRACTIVE OPTICS

In this paper we propose a hybrid system that optimally balances the optical power between the refractive lens and diffractive optical elements for achromatic extended-depth-of-field imaging. To optimize the power balance of the optical elements we build a fully-differentiable image formation model to jointly find the optical and recovery procedure parameters for computational cameras via end-to-end optimization with neural networks.

Кодирующие дифракционные оптические элементы (ДОЭ) появились в качестве альтернативы традиционной рефракционной оптике, чтобы преодолеть её ограничения (например, хроматическую абберацию) и обеспечить новые функциональные возможности, которые достижимы благодаря потенциалу ДОЭ для практически произвольной модуляции света.

Формирование изображений с помощью ДОЭ можно рассматривать как комбинацию трёх подходов: первый – это физическое распространение оптического волнового фронта; второй – математическая модель системы визуализации для данной оптической системы; и третий – вычислительный, на котором производится алгоритмическое

декодирование и финальная визуализация. Для оптимизации оптики, ДОО и изображений на основе этих трёх подходов требуется сквозная оптимизация – структура проектирования, которая начинается с передачи входных данных через разработанную математическую модель формирования изображения и заканчивается полным восстановлением изображения.

На рис. 1 изображена предложенная структура оптимизации, основанная на обучении нейросети и моделировании ДОО. В результате оптимизации мы получаем ДОО и нейросеть, которые дополняют друг друга и производят высококачественное формирование изображений [1]. На рис. 2 приведён экспериментальный результат формирования изображения для поставленной задачи.

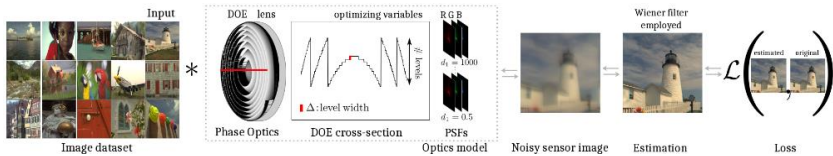


Рис. 1. Структура оптимизации фазово-кодированной оптики для ахроматического декодирования; спектральные PSF свернуты с помощью пакета изображений RGB; обратная визуализация обеспечивает оценку истинных изображений; на восстановленных изображениях определяется дифференцируемая потеря качества через среднеквадратичную ошибку по отношению к истинному изображению

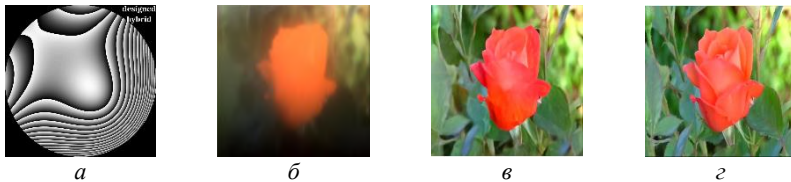


Рис. 2. Результат восстановления объекта оптической системой с ДОО: рассчитанный ДОО (а); закодированное изображение (б); восстановленное изображение, PSNR = 26 dB (в); идеальное изображение (г)

Идеальное изображение цветка (рис. 2г) с монитора зарегистрировано оптической системой с одной линзой и ДОО, смоделированным на пространственно-временном модуляторе света, и затем восстановлено (рис. 2в) обученной нейросетью.

Список литературы

1. Rostami S., et. al. // Appl. Opt. 2021. V. 60. P. 9365-9378.

Д.С. ГОНЧАРОВ^{1,2}, Р.С. СТАРИКОВ¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²ООО «Центр искусственного интеллекта МТС», Москва

КОГЕРЕНТНЫЕ ОПТИКО-ЦИФРОВЫЕ КОРРЕЛЯТОРЫ ИЗОБРАЖЕНИЙ С НЕЙРОСЕТЕВОЙ ОБРАБОТКОЙ ВЫХОДНЫХ СИГНАЛОВ

В работе предложена архитектура системы распознавания изображений на основе когерентного оптико-цифрового коррелятора и свёрточной нейронной сети, используемой в качестве постобработчика корреляционных сигналов. Выполнены численные и экспериментальные исследования возможности использования свёрточной нейронной сети для классификации корреляционных сигналов.

D.S. GONCHAROV^{1,2}, R.S. STARIKOV¹

¹National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

²MTS Artificial Intelligence, Moscow

COHERENT OPTICAL-DIGITAL IMAGE CORRELATORS WITH NEURAL NETWORK PROCESSING OF OUTPUT SIGNALS

The paper proposes the architecture of an image recognition system based on a coherent optical-digital correlator and a convolutional neural network used as a post-processor of correlation signals. Numerical and experimental studies of the possibility of using a convolutional neural network for the classification of correlation signals have been carried out.

Метод инвариантной корреляции изображений, основанный на пространственной фильтрации сигналов, в силу своей простоты может быть полностью реализован в оптической системе [1]. Использование инвариантных фильтров (ИФ) при распознавании изображений обеспечивает инвариантность к пространственному повороту объектов интереса, уровню освещённости, шумам и другим искажениям. Применение современных средств высокоскоростной модуляции оптических сигналов и высокоскоростных фотокамер даёт возможность распознавать изображения со скоростью до 30 тысяч кадров в секунду при размере кадра до 1920 × 1080 отсчётов.

Поскольку итоговый корреляционный сигнал является двумерной матрицей, его необходимо подвергнуть дальнейшему анализу, чтобы корректно классифицировать распознаваемое изображение. В качестве основных метрик корреляционного распознавания используются высота корреляционного сигнала, отношение пик/склон (PSR – peak to sidelob ratio) и отношение пик/энергия корреляции (PCE – peak to correlation energy) [1]. Существенным минусом этих метрик является практически полное пренебрежение формы корреляционного сигнала при его анализе.

Свёрточные нейронные сети (СНС) – современный инструмент, обеспечивающий высокое качество обработки информации. Блок-схема (рис. 1) описывает возможность использования СНС для обработки корреляционных сигналов. Распознаваемое изображение передаётся в когерентный оптико-цифровой коррелятор, где с использованием ИФ рассчитывается корреляционный сигнал, который фиксируется фотокамерой. Далее полученный сигнал обрабатывается СНС, которая классифицирует корреляционный сигнал. При этом используется СНС, предварительно обученная на некотором тренировочном наборе корреляционных сигналов.



Рис. 1. Блок-схема оптико-цифрового коррелятора с нейросетевой обработкой выходных сигналов

Предложенная архитектура системы распознавания изображений обеспечивает улучшение точности не менее, чем на 10 %. Эксперименты продемонстрировали успешную обработку корреляционных сигналов, полученных в оптико-цифровом корреляторе [2].

Список литературы:

1. Vijaya Kumar B.V.K., Mahalanobis A., Juday R.D. Correlation Pattern Recognition. Cambridge University Press, 2005.
2. Гончаров Д.С. Диссертация на соискание учёной степени к.ф.-м.н. Москва: НИЯУ МИФИ, 2021.

И.Н. КОМПАНЕЦ

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

**Н.Г. БАСОВ И ЛАБОРАТОРИЯ (ОТДЕЛЕНИЕ)
КВАНТОВОЙ РАДИОФИЗИКИ ФИАН**

Главным в научной деятельности руководителя лаборатории Н.Г. Басова являлось создание и развитие новых перспективных научных направлений, кардинально меняющих традиционные взгляды, и одновременно проведение исследований в уже развитых направлениях для обеспечения решения крупных и конкретных задач науки и техники.

I.N. KOMPANETS

Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

**N.G. BASOV AND THE LPI QUANTUM RADIOPHYSICS
LABORATORY (DIVISION)**

The main in N.G. Basov scientific activity as a head of the laboratory was the creation and development of new promising scientific areas, radically changing traditional views, and at the same time implementing the research in already developed areas to ensure the solution of large and specific problems of science and technology.

14 декабря 2022 года в России будет отмечаться 100-летие со дня рождения Нобелевского лауреата Николая Геннадьевича Басова. Двумя месяцами позже его ученики отметят и второй юбилей – 60-летие Лаборатории квантовой радиофизики ФИАН, его любимого детища.

Н.Г. Басов – выпускник Московского механического института 1950 года (так тогда назывался МИФИ) и впоследствии заведующий кафедрой МИФИ (по совместительству). Основным местом работы Н.Г. Басова после окончания аспирантуры МИФИ стал ФИАН – Физический институт им. П.Н. Лебедева АН СССР, а в нём Лаборатория колебаний, в которой он работал вначале под руководством А.М. Прохорова, а с 1959 г. – новый сектор молекулярных генераторов в составе Лаборатории колебаний и, затем, организованная им самим в феврале 1963 года Лаборатория квантовой радиофизики (ЛКРФ), ставшая в 1976 г. Отделением ФИАН.

Предвидя скорую реализацию лазеров, Н.Г. Басов уже в 1958 г. организовал и стал руководителем первой в СССР научной программы, выполняемой только ФИАН, по исследованию возможности генерации и усиления электромагнитного излучения в ИК и оптической области

спектра. В одном коллективе были объединены сотрудники разных лабораторий и отделов ФИАН, привлечено много молодёжи.

Для создателей лазеров было ясно, что уникальные характеристики лазерного излучения (когерентность, монохроматичность, возможность получения коротких импульсов и высоких мощностей) открывают широчайшие перспективы применения лазеров в науке, разных отраслях народного хозяйства, в военном деле. Уже в 1961 г. Н.Г. Басов и О.Н. Крохин первыми высказали идею осуществления лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) путём нагрева мишени излучением лазера до температуры, достаточной для протекания реакций синтеза.

К 1963 г. в стране уже нашли применения маломощные и очень точные молекулярные стандарты частоты на основе аммиака и водорода, а в ФИАН были созданы первые газовые и полупроводниковые лазеры и предложена широкая программа работ по исследованиям и применениям этих и других перспективных лазеров. По инициативе Н.Г. Басова в лаборатории КРФ были начаты работы по созданию стандартов частоты на основе маломощных газовых лазеров, работы по фотодиссоционным и химическим лазерам, по созданию лазерных усилителей и когерентных сумматоров, развернуты работы по мощным лазерам на разных активных средах и с разными типами накачки, в том числе с привлечением промышленных организаций и оборонного ведомства. Применение полупроводниковых инжекционных лазеров сулило революцию в средствах связи, информатики, видеотехники. Практика превзошла все ожидания учёных и показала, что с развитием работ по квантовой радиофизике вторая половина двадцатого века ознаменовалась открытием новой научно-технологической эры – лазерной, вставшей по своему значению в один ряд с атомной и космической эрами.

Может показаться удивительным, почему всего через 10 - 15 лет после окончания опустошительной войны советским учёным удалось совершить грандиозный вклад в мировую науку, открывший столь же грандиозные перспективы практического освоения результатов. По-видимому, труд ученых был очень востребованным, и государство реально заботилось о развитии в стране современной науки, – предположил Нобелевский лауреат А.М. Прохоров в поздравительной статье [1], посвящённой 75-летию Н.Г. Басова. Добавим само собой разумеющееся нам, что оба они были не просто талантливыми учёными, а научными гениями.

Список литературы

1. Прохоров А.М. // Квантовая электроника. 1997. Т. 24. № 12. С. 1061-1962.

С.С. СЛЮСАРЕНКО, Е.А. МЕЛЬНИКОВА, А.Л. ТОЛСТИК,
Л. ЛУККЕТТИ¹, Ф. СИМОНИ¹

Белорусский государственный университет, Минск

¹Политехнический университет, Анкона, Италия

ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В ЖК-ЯЧЕЙКАХ, ДОПИРОВАННЫХ МЕТИЛОВЫМ КРАСНЫМ

Проанализированы особенности проявления фотовольтаического эффекта в ячейках, заполненных нематическим жидким кристаллом (ЖК), допированным азокрасителем. Выявлена роль азокрасителя при переориентации директора ЖК. Экспериментально показано что формирование фотовольтаического поля носит немонотонный характер, связанный как с процессами, протекающими в объёме среды, так и на ориентирующих ЖК-поверхностях.

S.S. SLUSSARENKO, E.A. MELNIKOVA, A.L. TOLSTIK,
L. LUCCHETTI¹, F. SIMONI¹

Belarusian State University, Minsk

¹Marche Polytecnic University, Ancona, Italy

PHOTOVOLTAIC EFFECT IN LCD CELLS DOPED WITH METHYL RED

The peculiarities of the photovoltaic effect in cells with a nematic liquid crystal (LC) azo dye doped were analyzed. The role of the azo dye in the LC director reorientation is revealed. It is experimentally shown that the formation of the photovoltaic field has a non-monotonic character associated with both the processes occurring in the volume of the medium and on the orienting LC surfaces.

Более двадцать лет назад появились первые работы по переориентации молекул жидких кристаллов (ЖК) за счёт добавления азокрасителя. Был предложен метод, в котором краситель добавляется в сам ЖК [1] и переориентация происходит за счёт адсорбции красителя на одной из поверхностей при освещении лазерным излучением. Физический механизм не был ясен, однако указанный метод позволил не только переориентировать ЖК в ячейке при локальном освещении, но также позволил записывать изображения и высокоэффективные голографические решётки [2, 3]. В 1997 году было обнаружено [4], что в упомянутых ЖК-ячейках присутствует аномально высокий

фотовольтаический эффект, проявляющийся в генерации электрического потенциала при освещении ЖК-ячейки.

Целью настоящей работы является исследование динамики формирования фотовольтаического потенциала и выяснение его физического механизма. Особенностью изготовленной ЖК-ячейки было различие двух ограничивающих поверхностей. Одна поверхность представляла собой стекло, покрытое слоем ИТО и поливинилциннамат без натирки (изотропная поверхность). Вторая поверхность (стекло, покрытое слоем ИТО и полиимида) натиралась. ИТО слои подключались к системе регистрации на основе цифрового осциллографа. Лазерное излучение на длине волны 0,44 мкм направлялось на изотропную поверхность. При этом на ограничивающих поверхностях формировался электрический потенциал. Типичная динамика формирования потенциала при включении света и при его выключении представлена на рис. 1.

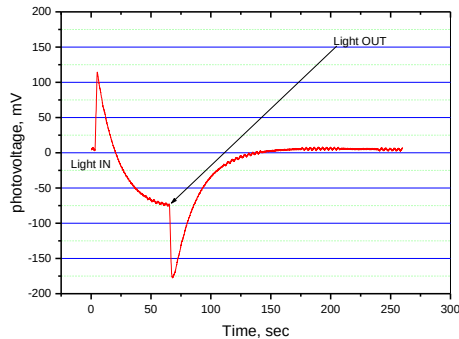


Рис. 1. Динамика электрического потенциала при световом воздействии

Для объяснения немонотонного динамического отклика предложено включение двух конкурирующих механизмов, связанных с процессами в объеме жидкого кристалла и фотовозбуждением носителей заряда в слое ИТО, являющимся полупроводником n-типа.

Список литературы

1. Reznikov Yu., Slussarenko S. // Mol. Materials, 1996. V. 6. P. 163-169.
2. Francescangeli O., Reznikov Yu., Simoni F., Slussarenko S. // Opt. Lett. 1997. V. 22 (8). P. 549-551.
3. Francescangeli O., Reznikov Yu., Simoni F., Slussarenko S. // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 71 (25). P. 3613-3615.
4. Khoo I.C., Slussarenko S., Guenther B., Shih M.Y. // Opt. Lett. 1998. V. 23 (4). P. 253-255.

К.Д. БАКЛАНОВА^{1,2}, П.В. ДОЛГАНОВ¹, В.К. ДОЛГАНОВ¹

¹*Институт физики твердого тела им. Ю.А. Осипьяна РАН, Черноголовка*

²*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Москва*

ПЕРИОДИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ В ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ

Приводятся результаты исследований одномерных, двумерных и трёхмерных упорядоченных структур, образующихся в хиральных холестерических жидких кристаллах. Изучены закономерности трансформации структур и их фотонных свойств при изменении периода холестерика.

K.D. BAKLANOVA^{1,2}, P.V. DOLGANOV¹, V.K. DOLGANOV¹

¹*Institute of Solid State Physics named after Yu.A. Osipyan of the RAS, Chernogolovka*

²*National Research University «Higher School of Economics», Moscow*

PERIODIC STRUCTURES IN LIQUID-CRYSTALLINE PHOTONIC CRYSTALS

We present results of investigations of one-dimensional, two-dimensional and three-dimensional ordered structures forming in chiral cholesteric liquid crystals. Transformation of the structures and their photonic properties with change of cholesteric period is studied.

Жидкие кристаллы, состоящие из ориентационно упорядоченных анизотропных молекул, образуют ряд фотонно-кристаллических структур. Примером одномерного фотонного кристалла служит холестерический жидкий кристалл со спиральным упорядочением молекул [1 - 4].

В работе оптическими методами изучено поведение жидкоккристаллического фотонного кристалла, образованного смесями нехирального нематического жидкого кристалла и хиральной добавки. Наличие хиральной добавки приводит к нарушению зеркальной симметрии и образованию спиральной структуры, вследствие чего появляется запрещённая фотонная зона. Период холестерической спирали уменьшается с увеличением содержания хиральной добавки (рис. 1). Изменение концентрации позволяет смещать положение фотонной запрещённой зоны в широких пределах. Поведение хиральных структур исследовано в плоских оптических ячейках толщиной от 5 до 40 мкм.

Нетривиальные структуры образуются при высокой температуре вблизи перехода жидкого кристалла в изотропную фазу. При малой концентрации хиральной добавки вблизи температуры фазового перехода спонтанно появляются периодические линейные дефекты. При большей концентрации образуется структура с двумерным упорядочением в плоскости образца, обладающая нетривиальными фотонными свойствами. При высокой концентрации (более 40 % хиральной добавки) образуются Голубые фазы [1] с трёхмерным упорядочением. Изучены спектральные характеристики структур в образцах различной толщины. Впервые исследованы фотонные свойства двумерной упорядоченной структуры. Обсуждается возможное устройство двумерной структуры, влияние упорядочения в плоскости образца и в перпендикулярном направлении на спектральные свойства.

Результаты демонстрируют возможность существования многообразия фотонных структур в хиральных жидкокристаллических средах.

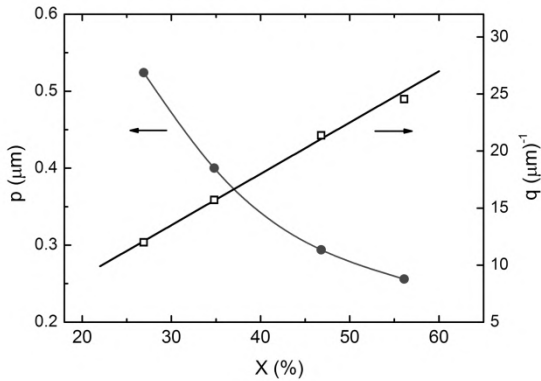


Рис. 1. Период спирали холестерика p , определённый из положения фотонной запрещённой зоны, и волновое число спирали q в зависимости от концентрации X хиральной добавки CB15 в нематическом жидком кристалле

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Список литературы

1. Wright D.C., Mermin N.D. // Rev. Mod. Phys. 1989. V. 61. P. 385.
2. Dolganov P.V., et al. // Phys. Rev. E. 2013. V. 87. P. 032506.
3. Dolganov P.V. // Phys. Rev. E. 2015. V. 91. P. 042509.
4. Dolganov P.V., Baklanova K.D., Bobrovsky A.Yu. // Liq. Cryst. 2021. V. 48. P. 1339.

Ю.А. КЛИШИН, Д.И. ЯКУБОВСКИЙ, М.К. ТАТМЫШЕВСКИЙ,
А.В. АРСЕНИН, Д.А. КАЗАРЯН, В.С. ВОЛКОВ

*Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет), Долгопрудный*

СТАБИЛЬНОСТЬ ТОНКИХ КРИСТАЛЛОВ CoPS_3

Методом спектроскопии комбинационного рассеяния исследуется устойчивость тонких кристаллов CoPS_3 в стандартных атмосферных условиях. Установлено отсутствие деградации материала под воздействием обычной атмосферы и светового воздействия. Показана возможность работы с тонкими кристаллами CoPS_3 без использования герметичных боксов и специальных методов защиты материала.

Yu.A. KLISHIN, D.I. YAKUBOVSKII, M.K. TATMYSHEVSKIY,
A.V. ARSENIN, D.A. GHAZARYAN, V.S. VOLKOV

Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

STABILITY OF THIN CRYSTALS CoPS_3

Raman spectroscopy is used to study the stability of thin CoPS_3 crystals under the standard atmospheric conditions. The absence of material's degradation under the influence of usual atmosphere and light exposure was found. The possibility of working with thin crystals CoPS_3 without the use of sealed boxes and special methods of protecting the material was shown.

CoPS_3 является слоистым полупроводниковым материалом с ХУ-анизотропными магнитными свойствам [1]. Данный материал представляет большой интерес, поскольку имеет уникальные антиферромагнитные свойства, подобные свойствам NiPS_3 [2], а кристаллическая структура с межслоевым ван-дер-ваальсовым взаимодействием позволяет получать тонкие слои методом механического расщепления. Это делает CoPS_3 перспективным магнитным двумерным кристаллом, однако, вопрос о его стабильности в случае тонких слоёв остается открытым.

В настоящей работе, методом спектроскопии комбинационного рассеяния исследуется деградация тонких слоёв CoPS_3 при нормальных атмосферных условиях. Образцы были получены методом механического расщепления при температурах 120 - 140 °С. В качестве подложек использовались $\text{Si}^{++}/\text{SiO}_2$ и кварц. Полученные тонкие кристаллы

отбирались при помощи оптической микроскопии с последующей характеристикой морфологии поверхности и определения толщины методом атомно-силовой микроскопии.

В КР-спектре 3D-CoPS₃ при комнатной температуре имеет пять мод. Две моды на уровне 149 и 278 см⁻¹ – относятся к дважды вырожденным модам E_g, три пика 242, 384 и 585 см⁻¹ – невырожденные моды колебаний A_g [3]. Как видно из графика (рис. 1а), по прошествии 100 часов соотношение интенсивностей и положение пиков не изменяется. Имеющиеся незначительные различия между спектрами не носят систематического характера и объясняются особенностями проведения измерений. Аналогичные исследования для различных по толщине тонких кристаллов (толщиной от 20 до 250 нм) проведённые с разностью в 14 дней также не демонстрирует признаков деградации. При этом оптическая микроскопия (рис. 1б) также не выявляет каких-либо изменений.

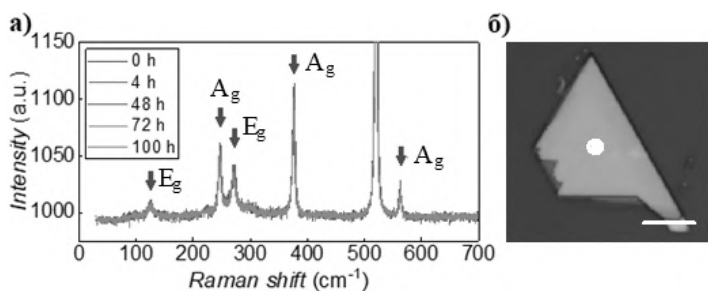


Рис. 1. Полученный КР-спектр (а), оптическое изображение исследуемого тонкого кристалла на подложке Si-SiO₂, масштаб 10 мкм (б)

Полученные результаты свидетельствуют об отсутствии деградации тонких слоёв кристалла при атмосферных условиях. При этом вопрос стабильности однослойных CoPS₃ требует дополнительных исследований. Таким образом, допустимо дальнейшее исследование физических свойств данного материала без использования дополнительных защитных мер.

Список литературы

1. Wildes A.R., et al. // Journal of Physics: Condensed Matter. 2017. V. 29. No. 45. P. 455801.
2. Wildes A.R., et al. // Physical Review B. 2015. V. 92. No. 22. P. 224408.
3. Liu Q., et al. // Physical Review B. 2021. V. 103. No. 23. P. 235411.

О.В. СИДОРОВА, А.В. КАДЕТОВА¹, М.Н. ПАЛАТНИКОВ¹

Петрозаводский государственный университет

*¹Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья
им. И.В. Тананаева Кольского научного центра РАН, Апатиты, Мурманская обл.*

ДЕФЕКТНАЯ СТРУКТУРА КРИСТАЛЛОВ $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДАМИ ПРЯМОГО И ГОМОГЕННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

В работе представлены сравнительные исследования структурного состояния кристаллов ниобата лития, легированных цинком, от концентрации легирующей примеси и технологии выращивания.

O.B. SIDOROVA, A.V. KADETOVA¹, M.N. PALATNIKOV¹

Petrozavodsk State University

*¹I.V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw
Materials of Kola Science Center of the RAS, Apatity, Murmansk region*

DEFECTIVE STRUCTURE OF $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ CRYSTALS GROWN BY DIRECT AND HOMOGENEOUS ALLOYING METHODS

The article presents comparative studies of the structural state of zinc-doped lithium niobate crystals, depending on the concentration of the dopant and the growth technology.

Сегнетоэлектрические кристаллы ниобата лития (LiNbO_3) при высоких уровнях легирования цинком обладают высокой стойкостью к оптическому повреждению и низкими значениями напряжённости коэрцитивного поля. Собственные и примесные дефекты, расположенные вдоль полярной оси, формируют полярные кластеры, что открывает перспективу использования кристаллов для преобразования лазерного излучения на искусственно созданных периодически поляризованных доменах субмикронных размеров [1].

В данной работе рентгенографическими методами исследовано структурное состояние кристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$, полученных методами прямого и гомогенного легирования. Метод прямого легирования подразумевает, что легирующая примесь добавляется уже в гранулированную шихту перед наплавлением тигля. Метод гомогенного легирования основан на том, что легирующую примесь вводят в оксид ниобия Nb_2O_5 . В этом случае повышается химическая гомогенность

шихты и, как следствие, структурная и оптическая однородность выращенных кристаллов. Кристаллы были получены методом Чохральского в воздушной атмосфере. Прецизионные дифракционные картины регистрировались в интервале углов рассеяния 2θ от 5 до 145 ° на дифрактометре ДРОН-6 в $CuK\alpha$ -излучении, монохроматор из пиролитического графита был установлен в первичных лучах. Точность в определении интенсивности в каждой точки дифракционной линии не меньше 5 %. Результаты уточнения структурных характеристик исследуемых образцов методом Ритвельда представлены в табл. 1.

Таблица 1. Уточнённые значения координат атомов (x/a , y/b , z/c) и коэффициентов заполнения позиций G в кристаллах $LiNbO_3:Zn$

	G	x/a	y/b	z/c		G	x/a	y/b	z/c
Прямое легирование $LiNbO_3:Zn$ $C_b = 5.84$ мол. % ($R_{wp}(\%) = 10.93$, $R_p(\%) = 7.9$)					Гомогенное легирование $LiNbO_3:Zn$ $C_b = 6.65$ мол. % ($R_{wp}(\%) = 5.37$, $R_p(\%) = 5.58$)				
Nb	0.98	0	0	0	Nb	0.965	0	0	0
O	1	0.056	0.343	0.079	O	1.00	0.056	0.354	0.064
Li	0.93	0	0	0.279	Li	0.94	0	0	0.282
Nb_{Li}	0.01	0	0	0.281	Nb_{Li}	0.012	0	0	0.269
Zn_{Li}	0.06	0	0	0.279	$Nb_{окт}$	0.001	0	0	0.12
					Zn_{Li}	0.04	0	0	0.279
					$Zn_{окт}$	0.024	0	0	0.106

Кристаллы, полученные методом гомогенного легирования, содержат больше дефектов по ниобию (ниобиевые вакансии, Nb_{Li} , $Nb_{окт}$), чем кристаллы, полученные методом прямого легирования. Примесь в обоих случаях легирования занимает вакантные позиции лития, однако в образце, полученном методом гомогенного легирования, часть атомов цинка занимает пустой кислородный октаэдр. Несмотря на предположение о том, что кристаллы, полученные методом гомогенного легирования, должны обладать более упорядоченной структурой, рентгенографические данные показывают обратное, в кристаллах присутствует дефект заполнения пустого октаэдра, который приводит к большему разупорядочению и искажению вдоль полярной оси.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-33-90038.

Список литературы

1. Сидоров Н.В., Волк Т.Р., Маврин Б.Н., Калинин В.Т. Ниобат лития: дефекты, фоторефракция, колебательный спектр, поляритоны. М.: Наука, 2003.

А.В. КОРИБУТ, И.О. КИНЯЕВСКИЙ, В.И. КОВАЛЕВ,
П.А. ДАНИЛОВ, Н.А. СМЕРНОВ, С.И. КУДРЯШОВ,
Е.Э. ДУНАЕВА¹, А.А. ИОНИН

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ НЕСТАЦИОНАРНОГО ВКР В КРИСТАЛЛЕ BaWO₄

В работе экспериментально исследуется влияние параметров фокусировки и ориентации кристалла на эффективность генерации сильнейшей ВКР-моды кристалла BaWO₄ под действием импульсов длительностью 300 фс на длине волны 515 нм.

A.V. KORIBUT, I.O. KINYAEVSKIY, V.I. KOVALEV,
P.A. DANILOV, N.A. SMIRNOV, S.I. KUDRYASHOV,
E.E. DUNAEVA¹, A.A. IONIN

Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

¹Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

INFLUENCE OF AN INTERACTION GEOMETRY ON EFFICIENCY OF TRANSIENT STIMULATED RAMAN SCATTERING IN BaWO₄ CRYSTAL

In this work, we experimentally study the influence of the focusing and orientation parameters of the crystal on the generation efficiency of the strongest SRS mode of the BaWO₄ crystal under action of pulses with duration 300 fs at a wavelength of 515 nm.

Для ультракоротких импульсов, когда длительность импульса меньше времени дефазировки колебаний среды, ВКР проходит в нестационарном режиме с эффективностью на уровне 1 % [1]. Однако в работах [2 3] была получена необычно высокая эффективность ВКР преобразования импульсов длительностью 300 фс в кристалле BaWO₄. Такая высокая эффективность достигалась за счёт жёсткой фокусировки в толщину кристалла, при которой наблюдалось совместное действие фазовой самомодуляции (ФСМ), которая формировала затравку, сдвинутую на частоту соответствующих мод спонтанного спектра комбинационного рассеяния, и ВКР, которое приводило к усилению данных компонент. В данной работе исследуется влияние параметров фокусировки и

ориентации кристалла на эффективность генерации двух мод кристалла BaWO_4 со сдвигами $\sim 330 \text{ см}^{-1}$ и 925 см^{-1} .

Схема эксперимента не отличалась от представленных в работах [2, 3]. Излучение второй гармоники волоконного лазера Satsuma (Amplitude Systemes) с параметрами: центральная длина волны 515 нм, длительность импульса 300 фс и энергия в импульсе до 3 мкДж, фокусировалось в толщину кристалла. За кристаллом устанавливалась вторая линза, которая фокусировала выходное излучение на входную щель спектрометра. Исследовались три типа фокусировок: линзы с фокусными расстояниями $f = 40 \text{ мм}$ и $f = 90 \text{ мм}$, и объектив с эффективным фокусным расстоянием $f = 20 \text{ мм}$, оптическая ось кристалла была перпендикулярна поляризации излучения.

При «слабой» фокусировке ($f = 90 \text{ мм}$) эффективность генерации не превосходила 8 % для компоненты 330 см^{-1} и 2 % для компоненты 925 см^{-1} . При $f = 40 \text{ мм}$ эффективность генерации составляли 40 % для компоненты 330 см^{-1} и 10 % для компоненты 925 см^{-1} . При $f = 20 \text{ мм}$ эффективность генерации составляли 40 % для компоненты 330 см^{-1} и 5 % для компоненты 925 см^{-1} . Таким образом, установлено, что наибольшая эффективность генерации ВКР компонент в кристалле BaWO_4 достигается при фокусировке линзой $f = 40 \text{ мм}$.

При $f = 40 \text{ мм}$ было обнаружено, что смещение положения фокуса к задней грани кристалла приводит к повышению эффективности генерации ВКР компонент в $\sim 1,5 - 2$ раза. В этих условиях исследовано влияние ориентации кристалла. Эффективности генерации ВКР пика со смещением $\sim 330 \text{ см}^{-1}$ для перпендикулярной и параллельной ориентации были примерно равны 70 %. Для компоненты со сдвигом 925 см^{-1} , зависимости имеют схожий характер (наблюдалось два локальных максимума в области энергии 1,8 мДж и 2,8 мДж), однако эффективности различны. При энергии 2,8 мДж эффективность генерации при перпендикулярной ориентации (23 %) оказалась в два раза больше, чем для параллельной.

В заключение, экспериментально исследована зависимость эффективности генерации от различных параметров. Показано, что для достижения максимальной эффективности существует оптимальная фокусировка, а также, что эффективность генерации зависит от ориентации кристалла.

Список литературы

1. Grabtchikov A.S., et. al. // Opt. Lett. 2003. V. 28 (1). P. 926-928.
2. Kinyaevskiy I.O., et. al. // Opt. Lett. 2020. V. 45 (8). P. 2160-2163.
3. Kinyaevskiy I.O., et. al. // Opt. Lett. 2021. V. 46 (3). P. 697-700.

Е.В. ДОРОФЕЕВА^{1,2}, И.С. МАНУЙЛОВИЧ¹, М.Н. МЕШКОВ^{1,3},
О.Е. СИДОРЮК^{1,3}

¹Научно-исследовательский институт «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха, Москва

²Институт биоорганической химии им. М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова РАН,
Москва

³Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет), Долгопрудный

УГЛОВАЯ АНИЗОТРОПИЯ РАССЕЯНИЯ СВЕТА ПОВЕРХНОСТЯМИ КРИСТАЛЛОВ КТР И ЕЁ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

В настоящей работе рассмотрены особенности способа кристаллографической ориентации нелинейных оптических элементов на основе исследований рассеяния лазерного излучения поверхностью кристалла КТР с грубой шлифовкой. В частности, особое внимание сосредоточено на явлении ярко выраженной угловой анизотропии рассеяния при наличии совершенной спайности.

E.V. DOROFEEVA^{1,2}, I.S. MANUYLOVICH¹, M.N. MESHKOV^{1,3},
O.E. SIDORYUK^{1,3}

¹POLYUS Research Institute of M.F. Stelmakh Joint Stock Company, Moscow

²Shemyakin-Ovchinnikov Institute of Bioorganic Chemistry of the RAS, Moscow

³Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

ANGULAR ANISOTROPY OF LIGHT SCATTERING BY THE SURFACES OF KTP CRYSTALS AND ITS USE IN CRYSTALLOGRAPHIC ORIENTATION OF NONLINEAR OPTICAL ELEMENTS

In this work, we consider the features of the technique of crystallographic orientation of nonlinear optical elements based on studies of laser radiation scattering on the surface of a KTP crystal with rough grinding. In particular, the main attention is paid to the phenomenon of pronounced angular anisotropy of scattering in the presence of perfect cleavage.

Кристаллы КТР нашли широкое применение в качестве нелинейных элементов для генерации второй (ГВГ) и смешанных гармоник лазерного излучения, параметрических генераторов света (ПГС). Поскольку характер всех процессов нелинейной оптики существенно зависит от

направления распространения излучения в кристалле, особое значение имеет достижение необходимой точности кристаллографической ориентации при формообразовании элементов для ГВГ и ПГС.

В настоящей работе рассмотрены физические основы способа ориентации кристаллов, основанного на исследовании рассеяния лазерного излучения шлифованной поверхностью кристалла КТР, явлении ярко выраженной угловой анизотропии рассеяния в случае кристалла с высокой спайностью. При нормальном падении лазерного излучения на поверхность кристалла максимум светорассеяния (рис. 1) оказывается под углом, равным двойному углу между плоскостью образца и плоскостью x кристалла (плоскостью спайности в КТР).

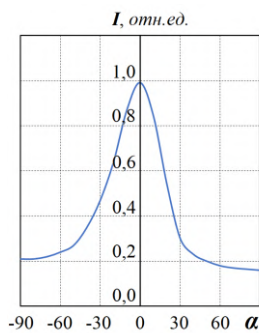


Рис. 1. Распределение рассеянного излучения в направлении максимума

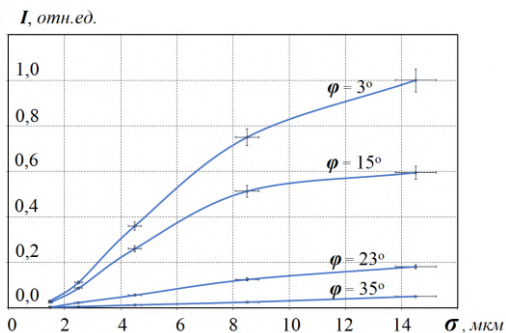


Рис. 2. Интенсивность аномального рассеяния

Установлено, что амплитуда сигнала I при регистрации пространственной диаграммы рассеяния излучения уменьшается с уменьшением шероховатости σ и увеличением угла между плоскостью поверхности образца и плоскостью спайности кристалла φ (рис. 2). Тем не менее эффект анизотропного рассеяния отчетливо наблюдается при углах φ вплоть до 40° .

Достигнутая чувствительность настройки на максимальный сигнал позволяет определять пространственное положение плоскости в кристалле КТР с точностью около пяти минут. Предложенный метод оказывается в ряде случаев более удобной альтернативой ориентации кристаллов с использованием дифракции рентгеновских лучей.

Список литературы

1. Гурздян Г.Г., Дмитриев В.Г., Никогосян Д.Н. Нелинейно-оптические кристаллы. Свойства и применение в квантовой электронике. Справочник. М.: Радио и связь, 1991.

М.А. АМАНОВА, В.Н. НАВНЫКО¹, А.В. МАКАРЕВИЧ¹,
В.В. ШЕПЕЛЕВИЧ¹

Институт телекоммуникаций и информатики Туркменистана, Ашхабад
¹Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина,
Беларусь

ПРИМЕНЕНИЕ КОВАРИАНТНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТЛИЧНЫХ ОТ НУЛЯ КОМПОНЕНТ ФЛЕКСОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТЕНЗОРА В КРИСТАЛЛАХ КЛАССА СИММЕТРИИ 23

Выполнен расчёт отличных от нуля компонент флексоэлектрического тензора четвёртого ранга f_{ijmr} для кубического кристалла класса симметрии 23. Определено количество отличных от нуля компонент тензоров для кристалла класса симметрии 23 применительно к двум вариантам внутренней симметрии: $[V^2]V^2$ и $[[V^2]^2]$. Показано, что тип внутренней симметрии кристалла влияет на вид флексоэлектрического тензора.

М.А. AMANOVA, V.N. NAUNYKA¹, A.V. MAKAREVICH¹,
V.V. SHEPELEVICH¹

Institute of Telecommunications and Informatics of Turkmenistan, Ashgabat
¹Mozyr State Pedagogical University named after I.P. Shamyakin, Belarus

APPLICATION OF COVARIANT METHODS TO DETERMINE NONZERO COMPONENTS OF FLEXOELECTRIC TENSORS IN CRYSTALS SYMMETRY CLASS 23

The calculation of nonzero components of the flexoelectric tensor of the fourth rank f_{ijmr} for a cubic crystal of symmetry class 23 was carried out. The number of nonzero components of tensors for a crystal of symmetry class 23 was determined for two variants of internal symmetry: $[V^2]V^2$ and $[[V^2]^2]$. It is shown that the type of internal symmetry of the crystal affects the form of the flexoelectric tensor.

Применим методику Ф.И. Федорова [1] для определения отличных от нуля компонент флексоэлектрического тензора четвёртого ранга f_{ijmr} , который в работах [2] определяется как параметр, характеризующий пространственную дисперсию пьезоэлектрических свойств среды.

Убедимся в том, что внутренняя симметрия кристалла влияет на число независимых компонент тензора. В кристаллофизике для описания внутренней симметрии тензоров чаще используется простая и удобная

система Яна [3]. Сделаем это применительно к двум вариантам внутренней симметрии флексоэлектрического тензора четвёртого ранга для кристаллов класса 23: $[V^2]V^2$ и $[[V^2]^2]$.

Для кристалла класса 23 формула симметрии может быть записана в виде $3L_24L_3$. Это означает, что кристаллы этого класса содержат три взаимно ортогональные оси симметрии второго порядка, любую из которых можно обобщённо обозначить единичным вектором $\vec{c}$, и четыре оси симметрии третьего порядка.

Рассмотрим, как наличие трёх взаимно перпендикулярных осей симметрии второго порядка влияет на компоненты флексоэлектрического тензора. Для определения отличных от нуля компонент флексоэлектрического тензора четвёртого ранга для кристалла рассматриваемого класса применяется преобразование – поворот на фиксированный угол $\varphi_k = 2\pi/k$, где $k = 2$, вокруг каждой из трёх взаимно ортогональных осей симметрии, направления которых заданы единичными ортами $\vec{e}_n$ ($n = 1, 2, 3$).

Повороту на угол φ_k вокруг $\vec{c}$ каждой из осей симметрии, по Ф.И. Федорову, соответствует преобразование:

$$S_k = \cos \varphi_k + (1 - \cos \varphi_k) \vec{c} \cdot \vec{c} + \sin \varphi_k \vec{c}^\times. \quad (1)$$

Здесь выражение $\vec{c} \cdot \vec{c}$ – диадное произведение двух одинаковых векторов $\vec{c}$, а символическое обозначение $\vec{c}^\times$ формально представляет антисимметричный тензор второго ранга, дуальный вектору $\vec{c}$. Последнее слагаемое в (1) обращается в нуль за счёт того, что при $k = 2$ множитель $\sin \varphi_k = \sin \pi = 0$, а $\cos \varphi_k$ в первом и втором слагаемых равен -1. В соответствии с принципом Неймана в результате преобразования (1) при $k = 2$ физические свойства кристалла не должны изменяться.

В результате проведённых расчётов выявлено, что в случае внутренней симметрии вида $[V^2]V^2$ флексоэлектрический тензор имеет пять отличных от нуля компонент, а у тензора с внутренней симметрией $[[V^2]^2]$ только три таких компонента. Сравнивая полученные результаты можно сделать вывод, что внутренняя симметрия тензора влияет на его структуру.

Данная работа выдвигается на соискание премии «TÜRKMENIŇ ALTYN ASYRY».

Список литературы

1. Федоров Ф.И. Теория упругих волн в кристаллах. Минск, 1965.
2. Вужва А.Д., Лямов В.Е. // Кристаллография. 1997. Т. 22. № 1. С. 131-137.
3. Katyal N., et al. // Optik. 2013. V. 124. № 1. P. 8-12.

Е.Н. САВЧЕНКОВ, С.М. ШАНДАРОВ, А.В. ДУБИКОВ,
Д.Е. КУЗЬМИЧ, М.А. ФЕДЯНИНА, Д.А. ГУБИНСКАЯ,
В.Я. ШУР¹, А.Р. АХМАТХАНОВ¹, М.А. ЧУВАКОВА¹

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
¹Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, Екатеринбург*

ДИФРАКЦИЯ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ НА РЕГУЛЯРНЫХ ДОМЕННЫХ СТРУКТУРАХ В ТАНТАЛАТЕ ЛИТИЯ

Экспериментально измерена эффективность изотропной и анизотропной дифракции Брэгга различных порядков на регулярной доменной структуре в кристалле 1% $\text{MgO}:\text{LiTaO}_3$ на длине волны 632.8 нм и её угловая селективность для первого и второго порядков.

E.N. SAVCHENKOV, S.M. SHANDAROV, A.V. DUBIKOV,
D.E. KUZMICH, M.A. FEDYANINA, D.A. GUBINSKAYA,
V.Ya. SHUR¹, A.R. AKHMATKHANOV¹, M.A. CHUVAKOVA¹

*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
¹Ural Federal University, Ekaterinburg*

LIGHT BEAM DIFFRACTION ON REGULAR DOMAIN STRUCTURES IN LITHIUM TANTALATE

The efficiency of isotropic and anisotropic Bragg diffraction of various orders on a regular domain structure in a 1% $\text{MgO}:\text{LiTaO}_3$ crystal at a wavelength of 632.8 nm and its angular selectivity for the first and second orders were experimentally measured.

Изотропная и анизотропная дифракция Брэгга на регулярной доменной структуре (РДС) с периодом $\Lambda = 7,99$ мкм изучалась для света с длиной волны 633 нм. РДС с ориентацией вектора решётки по оси X была сформирована в кристалле 1% $\text{MgO}:\text{LiTaO}_3$ с размерами 2×1 мм² по осям Y и Z соответственно. Пучок гауссовой формы с апертурой 0,7 мм и необыкновенной поляризацией от He-Ne лазера фокусировался цилиндрической линзой с $f = 250$ мм по оси Z кристалла на середину его входной Y -грани. При перестройке этого зондирующего пучка по углу в плоскости XY наблюдались дифрагированные пучки m -го порядка, поляризация которых определялась с помощью дихроичного поляризатора. Векторные диаграммы для изотропной (e - e) и анизотропной (e - o) дифракции (с изменением поляризации на обыкновенную волну)

представлены на рис. 1 и 2 соответственно, где волновые векторы $\vec{k}_o$ и $\vec{k}_e$ относятся к световым волнам, а $m\vec{K}$ определяет вектор решётки для m -ой фурье-компоненты возмущений, создаваемых доменными стенками РДС.

Результаты измерения эффективностей η_{e-e} и η_{e-o} для изотропной и анизотропной дифракции Брэгга в различные порядки представлены в табл. 1. Нормированные зависимости угловой селективности, измеренные экспериментально для дифракции в первый (сплошные круги) и второй (пустые круги) порядок, а также рассчитанные для длины взаимодействия $d = 1,85$ мм (сплошные кривые), иллюстрируются рис. 3 для анизотропной (а) и изотропной (б) геометрии, соответственно.

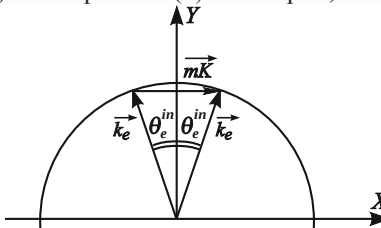


Рис. 1. Векторная диаграмма для изотропной дифракции

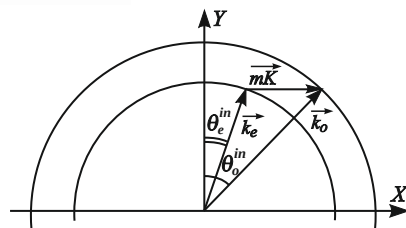


Рис. 2. Векторная диаграмма для анизотропной дифракции

Таблица 1. Эффективность дифракции Брэгга на РДС

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\eta_{e-e}, \%$	12,8	1,8	1,9	0,1	0,78	0,10	0,28	0,09	0,11
$\eta_{e-o}, \%$	0,4	0,46	0,27	0,23	0,07	0,01	0,01	-	-

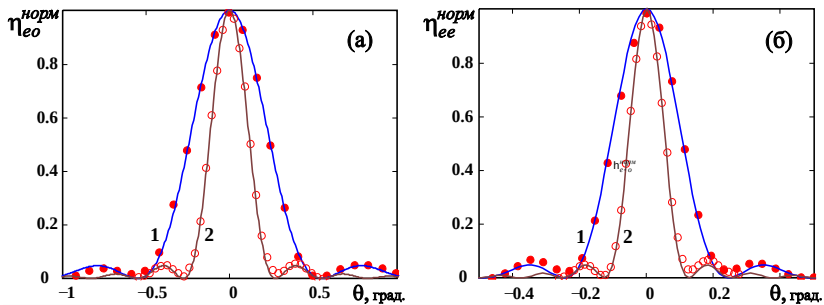


Рис. 3. Угловые зависимости эффективности анизотропной (а) и изотропной (б) дифракции Брэгга в первый (1) и второй (2) порядки

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Госзадания FEWM-2020-0038/3 на 2020-2022 годы.

А.К. ВОРОБЬЕВ¹, А.Ю. ОСТАПИВ¹, И.В. ГРИЩЕНКО^{1,2},
А.В. КОНЯШКИН², О.А. РЯБУШКИН²

¹Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет), Долгопрудный

²Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ И РАССЕЯНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ ТРИБОРАТА ЛИТИЯ И НИОБАТА ЛИТИЯ

Представлены результаты измерений коэффициентов оптического поглощения и рассеяния лазерного излучения в нелинейно-оптических кристаллах трибората лития LiB_3O_5 (LBO) и ниобата лития с регулярной доменной структурой LiNbO_3 (PPLN). Коэффициенты оптического поглощения и рассеяния в LBO на длинах волн 532 и 1070 нм и в PPLN на длине волны 3 мкм были измерены методом пьезорезонансной лазерной калориметрии. Коэффициенты рассеяния в обоих кристаллах были измерены стандартизованным методом интегрирующих сфер.

А.К. VOROBYEV¹, А.Yu. OSTAPIV¹, I.V. GRYSHENKO^{1,2},
А.В. KONYASHKIN², О.А. RYABUSHKIN²

¹Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

²Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS

OPTICAL ABSORPTION AND SCATTERING MEASUREMENTS IN LITHIUM TRIBORATE AND LITHIUM NIOBATE NONLINEAR OPTICAL CRYSTALS

The measurements of optical absorption and scattering coefficients of laser radiation in nonlinear-optical crystals of lithium triborate LiB_3O_5 (LBO) and periodically poled lithium niobate LiNbO_3 (PPLN) are presented. The absorption and scattering coefficients in both LBO at 532 and 1070 nm and PPLN at 3 mkm were determined using piezoelectric resonance laser calorimetry. The scattering coefficients were measured using the integration sphere technique.

Нелинейно-оптические кристаллы в области прозрачности имеют малые коэффициенты оптического поглощения и рассеяния, для измерения которых требуются чувствительные методы, одним из которых является пьезорезонансная лазерная калориметрия (ПРЛК). В основе ПРЛК лежит концепция эквивалентной температуры [1]. Кинетика

разогрева кристалла лазерным излучением измеряется бесконтактно по индуцированному сдвигу резонансных частот исследуемого образца. Сопоставление решения уравнения теплопроводности с измеренными кинетиками позволяет определить коэффициенты поглощения и рассеяния исследуемых материалов. Упрощённая схема экспериментальной установки ПРЛК показана на рис. 1. Возбуждение резонансов в исследуемом кристалле осуществляется бесконтактно внешним зондирующим радиочастотным полем за счёт обратного пьезоэффекта. Отклик анализируется синхронным детектором. Предварительно в условиях однородного разогрева производится температурная калибровка резонансных частот исследуемых образцов.

Определённые методом ПРЛК коэффициенты оптического поглощения кристалла LBO составили $(2.1 \pm 0.2) \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$ и $(11.9 \pm 1.2) \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$ для длин волн 1070 и 532 нм соответственно. Коэффициент оптического поглощения в кристалле PPLN на длине волны 3 мкм составил $(12 \pm 1) \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$. Значения коэффициентов рассеяния в боковых направлениях для LBO, измеренных методом ПРЛК, составили $(9 \pm 2) \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$ и $(24 \pm 2) \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ на длинах волн 532 и 1070 нм соответственно. Значения коэффициентов рассеяния в боковых направлениях для LBO, измеренных методом интегрирующих сфер, составили $(10 \pm 2) \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$ и $(20 \pm 2) \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ на длинах волн 532 и 1070 нм соответственно. Коэффициент рассеяния PPLN, измеренный методом ПРЛК, характеризует рассеяние только через боковые поверхности кристалла и составляет $(1.5 \pm 0.5) \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$. Оценка коэффициентов рассеяния PPLN, измеренных методом интегрирующих сфер, даёт $(2.0 \pm 0.7) \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ для рассеяния через боковые грани и $(1.0 \pm 0.4) \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$ для рассеяния через все грани, включая торцевые.

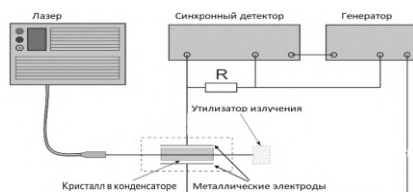


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки для измерений методом ПРЛК

Список литературы

1. Ryabushkin O.A., et al. Equivalent temperature of nonlinear-optical crystals interacting with laser radiation // Journal of the European Optical Society-Rapid publications. 2011. V. 6. P. 11032.

И.В. БЕГИЧЕВ^{1,2}, Ю.А. КЛИШИН¹, А.Н. ТОКСУМАКОВ^{1,3},
Г.А. ЕРМОЛАЕВ¹, Д.И. ЯКУБОВСКИЙ¹, А.В. АРСЕНИН¹,
Д.А. КАЗАРЯН¹, В.С. ВОЛКОВ¹

¹Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет), Долгопрудный

²Сколковский институт науки и технологий

³Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН, Москва

СПЕКТРАЛЬНАЯ ЭЛЛИПСОМЕТРИЯ АТОМАРНО ТОНКИХ КРИСТАЛЛОВ

В работе разработан метод численного анализа спектральной эллипсометрии атомарно тонких плёнок. Для применения разработанной процедуры необходимо снять показания эллипсометрии дважды: до и после нанесения очередного слоя кристалла. Изготовлен образец графена на кристалле гексагонального нитрида бора. Над образцом были проведены измерения и была опробована разработанная процедура.

I.V. BEGICHEV^{1,2}, Yu.A. KLISHIN¹, A.N. TOKSUMAKOV^{1,3},
G.A. ERMOLAEV¹, D.I. YAKUBOVSKY¹, A.V. ARSENIN¹,
D.A. GHAZARYAN¹, V.S. VOLKOV¹

¹Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

²Skolkovo Institute of Science and Technology

³N.M. Emanuel Institute of Biochemical Physics of the RAS, Moscow

SPECTRAL ELLIPSOMETRY OF ATOMICALLY THIN CRYSTALS

An approach to analyze data from thin films spectral ellipsometry is proposed in the work. The procedure is valid if the ellipsometry was measured twice: before and after laminating thin film. The sample of graphene on hBN was fabricated. The measurements were conducted using this sample and developed procedure was implemented.

Методами механического расщепления и «сухого» переноса на основе полимерных плёнок, изготовлены гетероструктуры, состоящие из атомарных слоёв гексагонального нитрида бора и графена. Изготовленные образцы исследованы и охарактеризованы методами спектроскопии комбинационного рассеяния и атомно-силовой микроскопии. Было показано, что слои графена имеют толщину ровно в один атом, и что

загрязнённость образцов незначительна. Оптический отклик от полученных образцов изучался методом спектральной эллипсометрии. Измерения были проведены при различных углах падения светового пучка на образец в видимом диапазоне длин волн до и после переноса однослойного графена.

В работе было применено несколько подходов по извлечению оптических постоянных графена из эллипсометрических данных. Первый подход заключался в подборе наиболее подходящих параметров дисперсионной зависимости Друде-Лоренца статистическими методами [1]. Второй, в рассмотрении набег фазы в графене как малого параметра возмущений [2]. В работе получено соотношение, которое можно использовать для нахождения оптических постоянных графена:

$$-2ik_0d\left(\frac{n_{\text{sub}}^2 - \sin^2 \theta}{n_{\text{sub}}^4 - n_{\text{sub}}^2 + \sin^2 \theta} \frac{\varepsilon^2 - n_{\text{sub}}^2 \varepsilon + n_{\text{sub}}^2 \sin^2 \theta}{\varepsilon} - \frac{\varepsilon - \sin^2 \theta - n_{\text{sub}}^2}{n_{\text{sub}}^2 - \sin^2 \theta - 1}\right) = \frac{\delta\psi}{\sin\psi \cos\psi} + i\delta\Delta. \quad (1)$$

В этом соотношении k_0 это волновое число падающего света, d – толщина изучаемого тонкого слоя, n_{sub} – показатель преломления подложки, θ – угол падения света на образец, ψ и Δ – измеренные эллипсометрические углы, соответственно. Оба подхода (статистический и аналитический) были применены к системе «стекло-гексагональный нитрид бора-графен». Соотношения, подобные (1), были получены также из первых принципов при рассмотрении решений уравнений Максвелла в графене [3].

Список литературы

1. El-Sayed M.A., Ermolaev G.A., Voronin K.V., et al. Optical constants of chemical vapor deposited graphene for photonic applications // *Nanomaterials*. 2021. V. 11 (5). P. 1230.
2. Lekner J. Analytic inversion of ellipsometric data for an unsupported nonabsorbing uniform layer // *J. Opt. Soc. Am. A*. 1990. V. 7. P. 1875-1877.
3. Drude P., Mann C.R., Millikan R.A. The theory of optics. New York: Longmans, Green, and Co., 1903.

М.И. КУПРЕЙЧИК, В.И. БАЛАКШИЙ, С.Н. МАНЦЕВИЧ
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

НИЗКОСЕЛЕКТИВНЫЕ РЕЖИМЫ ИЗОТРОПНОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА В ДВУОСНОМ КРИСТАЛЛЕ ЙОДИДА ИНДИЯ

Представлены результаты теоретического анализа характеристик одновременно широкополосных и широкоугольных режимов изотропной дифракции в косых срезах ромбического двуосного кристалла InI. Показана перспективность использования подобных вариантов рассеяния света для создания акустооптических приборов нового типа. В частности, предложен широкоугольный дефлектор, способный сканировать световые пучки с широким угловым спектром.

M.I. KUPREYCHIK, V.I. BALAKSHY, S.N. MANTSEVICH
Lomonosov Moscow State University

LOW-SELECTIVE REGIMES OF ISOTROPIC LIGHT SCATTERING IN A BIAxIAL INDIUM IODIDE CRYSTAL

The results of a theoretical analysis of the characteristics of simultaneously broadband and wide-angle regimes of isotropic diffraction in oblique sections of a rhombic biaxial crystal InI are presented. The prospects of applying such variants of light scattering for the acousto-optic devices of a new type implementation are shown. In particular, a wide-angle deflector intended for scanning light beams having a wide angular spectrum is proposed.

Акустооптические (АО) приборы, такие как дефлекторы, модуляторы и перестраиваемые фильтры, являются конкурентными и востребованными устройствами современной оптоэлектроники. Их высокое быстродействие, низкое энергопотребление, надёжность и простота конструкции позволяют оперативно и с высокой точностью управлять частотным и пространственным спектром оптического пучка [1, 2].

Подавляющее большинство современных АО приборов функционируют в брэгговском режиме, что позволяет достигать высоких значений эффективности дифракции (близких к 100 %) в рабочем дифракционном порядке. Важным недостатком такого режима АО взаимодействия является его высокая селективность. Последняя приводит к тому, что для создания высокоэффективных АО устройств различного

класса необходимо использовать разные геометрии дифракции. Так, в дефлекторах, как правило, используется вариант анизотропного широкополосного рассеяния света в одноосных кристаллах. Высокая угловая селективность, типичная для такого режима взаимодействия, определяет узкую угловую апертуру подобных приборов [1]. С другой стороны, излучение от целого ряда мощных источников оптического излучения обладает довольно высокой дифракционной расходимостью. Таким образом, возникает задача разработки новых АО устройств, способных сканировать сильно расходящиеся световые пучки.

Целью работы явилось исследование характеристик низкоселективных вариантов изотропного рассеяния света в двуосных кристаллах. Конкретные расчёты проводились для двуосного кристалла йодида индия (InI). Кристалл InI прозрачен в исключительно широком диапазоне длин волн от 0.62 до 50 мкм, что вкупе с высокой АО эффективностью делает его одним из наиболее перспективных материалов для разработки АО устройств ИК-диапазона [3]. Для вышеупомянутых режимов дифракции в кристалле InI были рассчитаны диапазоны взаимодействия и двумерные передаточные функции АО ячейки. В ходе расчётов выяснилось, что на основе таких конфигураций АО рассеяния могут быть созданы дефлекторы, заметно превосходящие существующие аналоги не только по величине угловой апертуры, но и по диапазону углов сканирования.

В работе также исследовалась эволюция формы двумерной передаточной функции подобной АО ячейки при изменении частоты ультразвука. Оказалось, что при перестройке акустической частоты происходит поворот (в пространстве) угловой компоненты оптического пучка, отвечающей центру передаточной функции. Указанная особенность позволяет в одной АО ячейке (без подстройки угла падения) осуществлять операции интегрирования и направленного дифференцирования изображения. Последнее может быть использовано для создания новых схем визуализации фазовых объектов АО методом [4].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант 19-12-00072).

Список литературы

1. Балакший В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985.
2. Goutzoulis A., Pape D. Design and fabrication of acousto-optic devices. NY: Marcel Dekker, 1994.
3. Porokhovnichenko D.L., Dyakonov E.A., et al. // Opt. Lett. 2020. V. 45 (13). P. 3435.
4. Balakshy V.I. // Appl. Opt. 2018. V. 57 (10). P. 56.

Г.Д. СЛИНЬКОВ^{1,2}, К.Б. ЮШКОВ¹

¹*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Москва*

²*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

АНАЛИЗ УГЛОВОЙ ДИСПЕРСИИ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ДЕФЛЕКТОРА

В работе проанализирована угловая дисперсия акустооптического дефлектора в режиме управления широкополосным фемтосекундным лазерным излучением. Продемонстрирована асимметрия полосы фазового синхронизма для прямой и обратной дифракции в тангенциальной геометрии дифракции в парателлурите.

G.D. SLINKOV^{1,2}, K.B. YUSHKOV¹

¹*National University of Science and Technology MISIS, Moscow*

²*Lomonosov Moscow State University*

ANGULAR DISPERSION ANALYSIS OF AN ACOUSTO-OPTIC DEFLECTOR

Angular dispersion of an acousto-optic deflector is analyzed for broadband femtosecond laser radiation. Asymmetrical phase matching bandwidth is demonstrated for direct and inverse tangential diffraction geometry in paratellurite.

В последнее время широкое распространение получили методы нелинейно конфокальной микроскопии на основе акустооптических дефлекторов (АОД), позволяющие реализовать трёхмерное управление положением фокусного пятна с произвольным доступом [1]. В таких системах для многофотонного возбуждения флюоресценции используются широкополосные фемтосекундные лазерные импульсы, поэтому проблема компенсации угловой и временной дисперсии при прохождении импульса через АОД является крайне актуальной [2]. Как правило, в таких системах используются стандартные АОД, изначально разработанные для одночастотного излучения. Оптимизация геометрии таких АОД включает в себя учёт сильной акустической анизотропии акустооптического материала, но вопросы угловой дисперсии не рассматриваются [3].

В настоящей работе теоретически исследована угловая зависимость эффективности и угла дифракции в АОД от длины волны лазерного излучения. В качестве объекта исследования выбран АОД на

парателлурите с направлением распространения акустической волны $6,4^\circ$ к оси [110].

На рис. 1 показаны частотно-угловые характеристики АОД на парателлурите при изменении длины волны в диапазоне от 700 до 900 нм, типичном для титан-сапфировых фемтосекундных лазеров. Пунктиром отмечена рабочая частота 75 МГц. Расчёты угловой дисперсии и фазовой расстройки, определяющей эффективность дифракции, были выполнены в плосковолновом приближении [3]. На рис. 2 показаны зависимости эффективности дифракции и угла дифракции от длины волны при дифракции типа «е $\rightarrow$ о» в +1 порядок (прямая тангенциальная геометрия) и при дифракции типа «о $\rightarrow$ е» в -1 порядок (обратная тангенциальная геометрия). Углы между волновым вектором дифрагировавшего излучения и волновым вектором ультразвука обозначены как χ и θ при дифракции для дифракции в +1 и -1 порядки соответственно; абсолютная величина угловой дисперсии равняется 0.053 мрад/нм. При длине взаимодействия 3 мм расчётная ширина полосы фазового синхронизма по уровню -3 дБ составляет 70 нм (для дифракции типа «о $\rightarrow$ е»), что достаточно для обработки ультракоротких лазерных импульсов длительностью менее 20 фс при условии компенсации угловой дисперсии.

Работа выполнена при поддержке РФФ (21-12-00247).

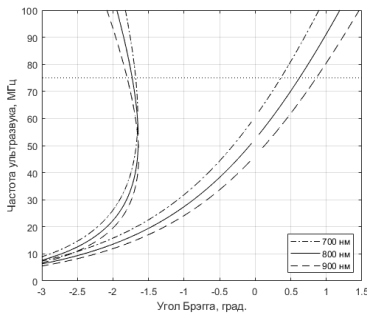


Рис. 1. Частотно-угловая характеристика тангенциальной геометрии АО взаимодействия

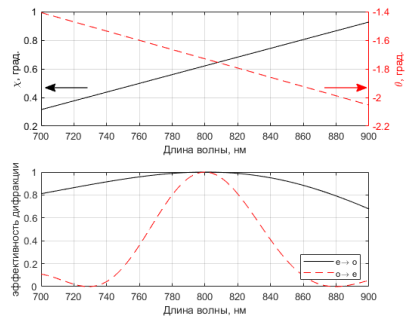


Рис. 2. Угловая дисперсия и эффективность дифракции фемтосекундного излучения в АОД

Список литературы

1. Griffiths V.A., et al. // Nat. Methods. 2020. V. 17. P. 741.
2. Yamaguchi A., Karagyzov D., Gershow M.H. // Opt. Lett. 2021. V. 46 (7). P. 1644.
3. Dupont S., Kastelik J.-C., Yushkov K.B., Gazelet J. // Ultrasonics. 2013. V. 53 (1). P. 219.

В.А. КРИВЕНКОВ^{1,2}, П.С. САМОХВАЛОВ², Ю.П. РАКОВИЧ^{1,3},
И.С. ВАСИЛЬЕВСКИЙ², Н.И. КАРГИН², И.Р. НАБИЕВ^{2,4}

¹Университет страны Басков, Сан-Себастьян, Испания

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

³Научный фонд страны Басков, Бильбао, Испания

⁴Университет города Реймс, Франция

НЕЛИНЕЙНОЕ ПЛАЗМОН-ЭКСИТОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УЛУЧШАЕТ ДВУХФОТОННЫЕ СВОЙСТВА КВАНТОВЫХ ТОЧЕК

Полупроводниковые квантовые точки (КТ) обладают высокими значениями двухфотонного поглощения, что позволяет использовать их в биодетекции и нелинейной оптоэлектронике. Однако применение КТ при двухфотонном возбуждении затруднено из-за необходимости использования высокоинтенсивных лазеров. Описывается способ уменьшения интенсивности возбуждения на порядок за счёт двухквантового переноса энергии от плазмонов в металлических наночастицах (МНЧ) к экситонам в КТ, расположенных вблизи МНЧ.

V.A. KRIVENKOV^{1,2}, P.S. SAMOKHVALOV², Yu.P. RAKOVICH^{1,3},
I.S. VASIL'EVSKI², N.I. KARGIN², I.R. NABIEV^{2,4}

¹Basque University, San Sebastian, Spain

²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

³Basque Foundation for Science, Bilbao, Spain

⁴University of Reims Champagne-Ardenne, France

NONLINEAR PLASMON-EXCITON INTERACTION IMPROVES TWO-PHOTON PROPERTIES OF QUANTUM DOTS

Semiconductor quantum dots (QDs) feature high values of the two-photon absorption, enabling their applications in biosensing and nonlinear optoelectronics. However, the applications of QDs under two-photon excitation are hindered by the requirement of high-intensity laser excitation. Here, we show the way to reduce the required excitation intensities by order of magnitude using the two-quantum energy transfer from linearly excited plasmons in metal nanoparticles (MNPs) to excitons in QDs located close to MNPs.

Полупроводниковые квантовые точки (КТ) известны своей способностью к нелинейному взаимодействию со светом посредством двухфотонного поглощения (ДФП) [1], что позволяет использовать их в

биодетекции и нелинейной оптоэлектронике [2]. Однако применение КТ при двухфотонном возбуждении затруднено из-за необходимости использования высокоинтенсивных лазеров. ДФП может быть дополнительно усилено за счёт взаимодействия экситонов КТ с плазмонами металлических наночастиц [3]. Это даёт возможность создания высокоэффективных оптоэлектронных устройств на основе КТ с нелинейным откликом на облучение.

Чтобы снизить необходимую интенсивность для двухфотонного возбуждения КТ, в данной работе был создан гибридный материал на основе квантовых точек и серебряных нанопластин (СНП). Целью было достижение высокоэффективного нелинейного отклика фототока в ближнем инфракрасном (БИК) диапазоне возбуждения. Слой квантовых точек CdSe служил источником носителей заряда для фотоприёмника фоторезисторного типа, в который для повышения эффективности поглощения света вводились СНП с плазмонными модами в ближнем ИК-диапазоне. Измерение зависимости фототока от интенсивности возбуждения показало, что зависимость тока от интенсивности в инфракрасном диапазоне является квадратичной по отношению к соответствующей зависимости при возбуждении видимым светом. Это доказало, что созданный фотоприёмник эффективно работает в двухфотонном режиме. Хотя поглощение света СНП происходило однофотонно в линейном режиме, энергия передавалась от плазмонов к экситонам в двухквантовом режиме, что приводило к нелинейной зависимости. Более того, было обнаружено, что для достижения одинаковых значений фототока от сконструированного фотоприёмника, и от фотоприёмника, содержащего только КТ, необходимая интенсивность возбуждения была на порядок ниже. Это можно объяснить вызванным плазмонами увеличением эффективности ДФП в КТ.

Работа поддержана грантом Российского научного фонда № 18-72-10143. V.K. has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under the Marie Skłodowska-Curie, grant agreement No. 101025664 (QESPEM).

Список литературы

1. Krivenkov V.A., et al. // ACS Photonics. 2020. V. 7 (3). P. 831-836.
2. Krivenkov V.A., et al. // Biosens. Bioelectron. 2019. V. 137. P. 117-122.
3. Krivenkov V.A., et al. // Nanoscale. 2021. V. 13 (8). P. 4614-4623.

К.Д. КОСОЛАПОВА, А.А. ВЕДЕРНИКОВА, И.А. АРЕФИНА,
Е.В. УШАКОВА

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОННЫХ ПЕРЕХОДОВ УГЛЕРОДНЫХ ТОЧЕК В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТИПА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ГРУПП НА ПОВЕРХНОСТИ

Приведены результаты исследования химии поверхности углеродных наночастиц в зависимости от различных добавок с помощью ИК-спектроскопии. Определены функциональные группы на поверхности углеродных наночастиц. Полученные результаты данной работы позволят описать особенности формирования электронной структуры и строения поверхности углеродных точек.

K.D. KOSOLAPOVA, A.A. VEDERNIKOVA, I.A. AREFINA,
E.V. USHAKOVA

ITMO University, Saint-Petersburg

ENERGY STRUCTURE STUDIES OF CARBON DOTS ELECTRON TRANSITIONS DEPENDING ON THE TYPE OF FUNCTIONAL GROUPS AT THE SURFACE

The study of the carbon dot's surface chemistry depending on various additives using FTIR spectroscopy has been carried out. Functional groups at the surface of carbon dots have been determined. The obtained results of this work will allow us to describe the features of the formation of the electronic structure and the structure of the carbon dot's surface.

Углеродные точки – новый класс наноструктур, которые обладают рядом преимуществ в сравнении с другими углеродными наноматериалами [1]. Несмотря на то, что природа фотolumинесценции углеродных точек, зависящая от возбуждения, активно обсуждается во многих источниках литературы, исследования оптических свойств углеродных точек в зависимости от химического состава поверхности могут дать дополнительную информацию об электронной подсистеме таких наноструктур.

Целью работы является исследование морфологии и оптических свойств углеродных точек в зависимости от типа добавок при обработке их поверхности в коллоиде. В данной работе объектом исследования стали

углеродные точки, синтезированные гидротермальным синтезом с использованием о-фенилендиамина (o-pd) и бензойной кислоты в соотношении 1:0.75. Для изменения химического состава поверхности углеродных точек к 300 мкл исходного раствора добавлялось 75 мкл этилендиамина (ethylenediamine, EDA) или перекиси водорода (H_2O_2). Полученные смеси подвергались механическому размешиванию в течение 12 часов.

Химия поверхности функционализированных углеродных наночастиц была исследована с помощью инфракрасной спектроскопии (Fourier-transform infrared spectroscopy, FTIR), полученные спектры приведены на рис. 1.

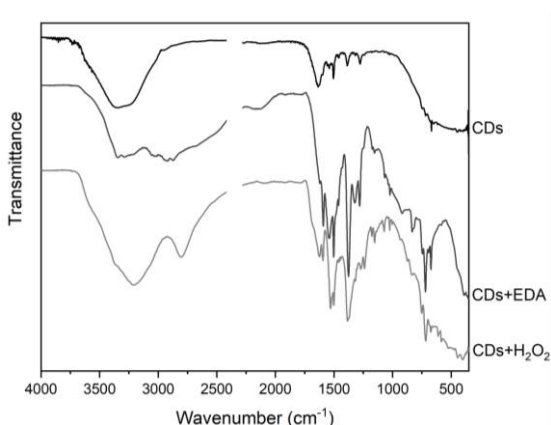


Рис. 1. FTIR спектры углеродных точек (CDs): CDs без добавок (чёрный), CDs + EDA (тёмно-серый), CDs + H_2O_2 (светло-серый)

Видно, что FTIR спектры образцов углеродных точек различаются: новые пики поглощения появляются в спектрах функционализированных частиц, что говорит о появлении новых молекулярных групп на поверхности. Комплексное исследование приведет к получению новой информации о том, как морфология углеродных точек влияет на их электрические и оптические свойства.

Список литературы

1. Li D., et. al. Optical properties of carbon dots in the deep-red to near-infrared region are attractive for biomedical applications // Small. 2021. V. 17. P. 2102325.

А.В. СЮЙ, Г.И. ЦЕЛИКОВ, Д.А. ПАНОВА,
А.В. АРСЕНИН, В.С. ВОЛКОВ

*Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет), Долгопрудный*

ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА НАНОЧАСТИЦ НА ОСНОВЕ ZnS

Приведены результаты экспериментов по лазерной абляции слоистого гексагонального сульфида цинка с помощью фемтосекундных лазерных импульсов в жидкости. Определены условия и причины формирования наночастиц с диаметрами 20 - 40 нм. Были изучены спектральные и временные особенности сигнала фотолюминесценции в диапазоне 380 - 700 нм.

A.V. SYUY, G.I. TSELIKOV, D.A. PANOVA,
A.V. ARSENIN, V.S. VOLKOV

Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

PHOTOLUMINESCENT PROPERTIES OF ZnS BASED NANOPARTICLES

The results of experiments on laser ablation of layered hexagonal zinc sulfide using femtosecond laser pulses in a liquid are presented. The conditions and reasons for the formation of nanoparticles with diameters of 20 - 40 nm have been determined. Spectral and temporal behaviour of photoluminescence signal were studied in the spectral range from 380 up to 700 nm.

ZnS является одним из наиболее изученных и принадлежит к семейству полупроводниковых соединений II-VI с широкой запрещённой зоной (3,7 эВ), которые имеют большое количество применений в нанотехнологиях, поскольку относительно легко адаптировать оптические и электронные свойства этих материалов, контролируя форму наноструктур [1]. ZnS является одним из наиболее важных материалов в оптоэлектронных приложениях благодаря своим фотолюминесцентным свойствам [2]; он также используется как фотокатализатор [3].

Цель работы – экспериментальное исследование фотолюминесцентных свойств гибридных наночастиц ZnS:M (M = Cu, Ag, Au), синтезированных методом лазерной фрагментации. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Мы использовали фемтосекундный лазер (100 мкДж, 1030 нм, 250 фс), а в качестве фокусирующего объектива –

сферическую линзу с $f = 100$ мм. Время облучения составляет 15 - 60 минут при фокусировке внутри раствора. В зависимости от режима облучения и выбора жидкости зависит морфология синтезированных наночастиц. В качестве прекурсоров используется расслоенный ZnS из объёмного кристалла с помощью ультразвука и металлический порошок Cu, Ag, Au. Определены режимы лазерной фрагментации для формирования наночастиц ZnS:M с диаметрами 20 - 40 нм.

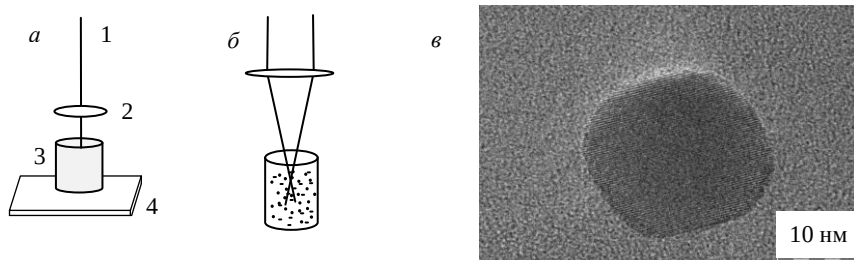


Рис. 1. Схема лазерной фрагментации в жидкости: принципиальная схема: 1 – излучение фемтосекундного лазера, 2 – линза, 3 – кювета, 4 – столик (а); схема фокусировки (б); наночастица ZnS:Ag (в)

Исследуемые наночастицы ZnS:M демонстрируют наличие экситонной полосы фотolumинесценции в диапазоне 400 - 500 нм, а также широкое плечо в диапазоне 600 - 700 нм связанное с рекомбинацией носителей, захваченных на поверхностные дефектные состояния, образованные в результате внедрения металлов в структуру наночастиц. Было показано, что кинетики фотolumинесценции могут быть аппроксимированы биэкспоненциальным спадом с характерными временами 0.5 - 0.8 и 5 - 6 нс в зависимости от типа и концентрации металлической примеси. При этом взаимодействие плазмонного резонанса в серебре с экситонным резонансом в ZnS резонансно усиливает сигнал поглощения гибридных наночастиц в УФ-области 380 - 400 нм. Обнаруженная модификация спектрального состава и времен жизни фотolumинесценции позволяет сделать вывод о возникновении в результате легирования наночастиц металлами энергетических уровней, находящихся в запрещённой зоне сульфида цинка, что может найти применение в задачах фотокатализа.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 21-79-00206

Список литературы

1. Burda C., et. al. // Chemical Reviews. 2005. V. 105. P. 1025.
2. Feldmann C., et. al. // Advanced Functional Materials. 2003. V. 13. P. 511.
3. Zhao Q., et. al. // Crystal Growth & Design. 2007. V. 7. P. 153.

Л.И. КАРМАЗИН, В.М. КОРШУНОВ¹, М.Т. МЕТЛИН¹,
И.В. ТАЙДАКОВ¹

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НОВЫХ КООРДИНАЦИОННЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ОСНОВЕ ИОНОВ ЛАНТАНОИДОВ С ИЗЛУЧЕНИЕМ В ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ

Приведены результаты исследования по изучению фотолуминесцентных свойств координационных соединений на основе ионов самария, неодима и празеодима. Проанализировано влияние числа молекул органического лиганда в соединениях на оптическое поглощение комплексов, форму спектров люминесценции и её эффективность в видимой и ближней инфракрасной (БИК) областях.

L.I. KARMAZIN, V.M. KORSHUNOV¹, M.T. METLIN¹,
I.V. TAIDAKOV¹

Bauman Moscow State Technical University

¹Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

THE INVESTIGATION OF NOVEL COORDINATION COMPOUNDS OF LANTHANIDE IONS PHOTOPHYSICAL PROPERTIES IN THE INFRARED RANGE

We present the results of our research on photoluminescence properties of coordination compounds based on samarium, neodymium and praseodymium ions. We analyzed the correlation between number of organic ligand molecules in compounds and the optical absorption of the complexes, the shape of the luminescence spectra, and its efficiency in the visible and near infrared (NIR) regions.

Люминофоры, способные эффективно излучать в ближнем инфракрасном диапазоне (БИК), активно исследуются последние несколько десятилетий. Интерес к таким веществам обусловлен широким спектром практических применений в медицине, военной промышленности, а также рядом других приложений. Координационные соединения ионов лантаноидов являются одними из потенциальных классов материалов для использования в качестве люминофоров с излучением в БИК диапазоне спектра. Это объясняется высоким

теоретическим квантовым выходом их излучения, который может достигать 99 % [1]. Кроме того, для таких соединений характерны узкие спектральные линии эмиссии порядка нескольких нанометров. Таким образом, данный класс материалов может быть перспективным для создания источников монохроматического излучения.

Целью настоящей работы является установление влияния числа молекул органического лиганда из класса 1,3-дикетонов в координационных соединениях трёхвалентных ионов лантаноидов на свойства люминесценции в видимой и инфракрасной областях спектра. В качестве центров эмиссии были выбраны ионы Sm(III), Nd(III) и Pr(III). В зависимости от количества молекул органического лиганда, комплексы будут маркироваться как Sm3, Nd3, Pr3 для трёх молекул, а также Sm4, Nd4, Pr4 для четырёх.

На рис. 1 представлены спектры люминесценции соединений ионов Sm(III) и Nd(III) в БИК диапазоне. В спектрах излучения наблюдаются узкие спектральные полосы, характерные для $f-f$ переходов ионов [2]. Установлено, что увеличение числа молекул лиганда в соединении не приводит к изменению квантового выхода люминесценции в инфракрасной области.

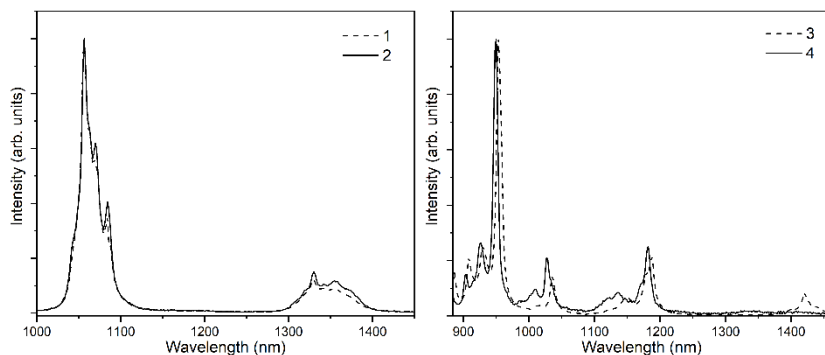


Рис. 1. Спектры люминесценции комплексов неодима и самария в БИК области спектра: 1 – Nd3, 2 – Nd4, 3 – Sm3, 4 – Sm4

Список литературы

1. Левшин Л.В., Салецкий А.М. Оптические методы исследования молекулярных систем. Ч. 1. Молекулярная спектроскопия. М.: Изд-во МГУ, 1994.
2. Lanthanide luminescence: photophysical, analytical and biological aspects / ed. by P. Hanninen, H. Hama. Springer Ser Fluoresc., 2011.

Т.О. ОСКОЛКОВА, Е.П. КОЛЕСОВА, А.О. ОРЛОВА

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ПЕРЕНОС ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ В АГРЕГАТАХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК CdSe/ZnS

В работе исследованы люминесцентные свойства агрегатов квантовых точек (КТ) CdSe/ZnS. Показано, что в процессе агрегации квантовый выход люминесценции уменьшается с 10 % до 2 %. При этом наблюдается ярко выраженная линейная зависимость характерного времени затухания люминесценции от длины волны регистрации. Проведена оценка эффективности переноса энергии с учётом размерного распределения КТ в ансамбле.

T.O. OSKOLKOVA, E.P. KOLESOVA, A.O. ORLOVA

ITMO University, Saint-Petersburg

ELECTRONIC EXCITATION ENERGY TRANSFER IN CdSe/ZnS QUANTUM DOTS AGGREGATES

In this study the luminescence properties of CdSe/ZnS quantum dots (QDs) were investigated. We demonstrate that the photoluminescence quantum yield reduces from 10% to 2% upon the aggregation process. Meanwhile, a pronounced linear registration wavelength dependence of the characteristic luminescence lifetime was observed. The energy transfer efficiency was evaluated according to the size distribution in a QD ensemble.

Коллоидные полупроводниковые нанокристаллы на основе халькогенидов кадмия представляют собой класс искусственных люминофоров с хорошо изученными фотофизическими свойствами [1]. Особенностью квантовых точек (КТ), как и других коллоидных наночастиц, является их склонность к агрегации [2]. В процессе формирования агрегатов происходит сокращение расстояния между ближайшими КТ в ансамбле, что может стать причиной увеличения эффективности их взаимодействий. Поскольку коллоидный раствор КТ представляет собой ансамбль частиц различного размера, то в рамках данной системы КТ малого размера могут выступать в роли доноров энергии для больших нанокристаллов [3, 4]. В данном случае, речь идет о переносе энергии по механизму FRET (Förster resonance energy transfer) [5], эффективность которого значительно увеличивается при агрегации, что, в свою очередь, может оказать существенное влияние на люминесцентные свойства КТ.

В качестве модельного объекта для исследования переноса энергии в агрегатах КТ использовались полупроводниковые нанокристаллы типа ядро/оболочка CdSe/ZnS. Образцы с различной степенью агрегации были получены в результате добавления метанола в раствор КТ в хлороформе.

Анализ стационарных спектров люминесценции показал, что агрегация КТ сопровождается тушением люминесценции на 80 % и спектральным сдвигом её полосы в длинноволновую область на 10 нм. При этом положение экситонных пиков спектра поглощения не было подвергнуто изменению. Помимо этого, квантовый выход люминесценции ансамбля КТ уменьшился с 10 до 2 % в процессе агрегации.

Кинетика люминесценции образцов исследовалась с помощью время-разрешённой микроскопии. Для анализа зависимости времени затухания люминесценции от длины волны излучения использовались интерференционные фильтры, позволяющие выделять люминесценцию в узких интервалах длин волн. В образцах с высокой степенью агрегации наблюдалась линейная зависимость характерного времени затухания люминесценции от длины волны регистрации. С увеличением длины волн росло среднее время затухания люминесценции, при этом скорость наблюдаемого роста хорошо коррелирует со степенью агрегации КТ.

Наблюдаемые эффекты можно объяснить формированием нового канала релаксации фотовозбуждения в КТ, связанного с переносом энергии по механизму FRET. В рамках теории Фёрстера КТ малого размера являются донорами энергии, а большие КТ – акцепторами. В работе была проведена оценка эффективности переноса энергии с помощью теории Фёрстера [5]. Полученное теоретическое значение составило 40 %. Также был произведён расчёт эффективности с учётом дисперсии КТ по размерам, в ходе которого были учтены вероятности взаимодействия нанокристаллов каждой фракции. В рамках данной модели суммарная эффективность переноса энергии фотовозбуждения не превышает 10 %.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках ГЗ 2019-1080, гранта 08-08 РФ и гранта НИРМА ФТ МФ Университета ИТМО.

Список литературы

1. Efros A.L., Brus L.E. // ACS nano. 2021. V. 15 (4). P. 6192-6210.
2. Li C., Hassan A., et al. // Journal of Nanoparticle Research. 2020. V. 22 (11) P. 1-29.
3. Chern M., Toufanian R., et. al. // Analyst. 2020. V. 145 (17). P. 5754-5767.
4. Hottechamps J., Noblet T., et al. // ChemPhysChem. 2020. V. 21. P. 853-862.
5. Förster T. // Ann. Phys. 1948. V. 437. P. 55-75.

Г.Р. ВОСКАНЯН, А.В. ГРИЦИЕНКО¹, А.Т. МАТВЕЕВ²,
Н.С. КУРОЧКИН¹, С.П. ЕЛИСЕЕВ^{1,3}, А.Г. ВИТУХНОВСКИЙ^{1,3}

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

¹*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

²*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»*

³*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный*

ГЕНЕРАЦИЯ ОДИНОЧНЫХ ФОТОНОВ В ДЕФЕКТАХ НАНОКРИСТАЛЛОВ ГЕКСАГОНАЛЬНОГО НИТРИДА БОРА

В данной работе исследуются нанокристаллы гексагонального нитрида бора (hBN) с латеральными размерами до 10 нм, содержащие фотостабильные излучатели. Проведены спектрально-кинетические измерения одиночных излучающих дефектов в нанокристаллах, а также получена генерация одиночных фотонов.

G.R. VOSKANYAN, A.V. GRITSYENKO¹, A.T. MATVEEV²,
N.S. KUROCHKIN¹, S.P. ELISEEV^{1,3}, A.G. VITUKHNOVSKY^{1,3}

Bauman Moscow State Technical University

¹*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

²*National University of Science and Technology MISIS, Moscow*

³*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny*

SINGLE PHOTONS GENERATION IN DEFECTS OF HEXAGONAL BORON NITRIDE NANOCRYSTALS

In this paper, nanocrystals of hexagonal boron nitride (hBN) with lateral dimensions up to 10 nm containing photostable emitters are investigated. Single luminescent defects in nanocrystals were studied by time-resolved microscopy and optical spectroscopy, and the generation of single photons was obtained.

Флуоресцентные наночастицы играют неотъемлемую роль во многих областях, начиная от биомедицинской визуализации и зондирования и заканчивая нанофотонными устройствами и приложениями [1 - 3]. В последние годы квантовые излучатели в гексагональном нитриде бора (hBN) – двумерном полупроводнике с широкой полосой пропускания – становятся привлекательной основой нанофотоники. Они демонстрируют сверхвысокую яркость и надёжность в различных условиях [4]. Так, в

отличие от алмаза или сапфира, hBN наночастицы можно создавать простым способом на основе подходов «снизу-вверх» или «сверху-вниз» достигая необходимых размеров. Недавно был разработан доступный метод гидротермального синтеза «снизу-вверх» наночастиц гексагонального нитрида бора [5].

Целью работы является экспериментальное исследование оптических свойств дефектной структуры наночастиц hBN, полученных с помощью низкотемпературного гидротермального синтеза. На рис. 1 представлена карта фотолюминесценции наночастиц, полученная с помощью сканирующего конфокального микроскопа с возбуждением непрерывным лазером на длине волны 532 нм. Были исследованы времена жизни люминесцентных областей с использованием времяразрешённой микроскопии. Для отдельных точек были получены автокорреляционные функции второго порядка ($g^{(2)}(t)$) со значительным провалом в области временной задержки $t = 0$ (рис. 2). Данные функции были получены с использованием интерферометра Хэнбери Брауна-Твисса. Наличие провала свидетельствует о субпуассоновской статистике фотонов, то есть о генерации одиночных фотонов дефектами hBN.

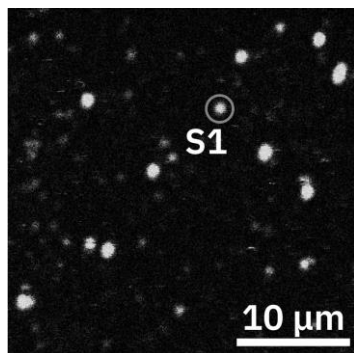


Рис. 1. Карта фотолюминесценции образца

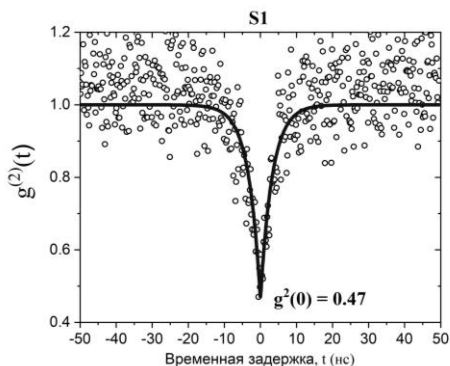


Рис. 2. Автокорреляционная функция второго порядка точки S1

Список литературы

1. Wolfbeis O.S // Chemical Society Reviews. 2015. V. 44. P. 4743-4768.
2. J.J., et al. // Nano today. 2016. V. 11. P. 309-329.
3. Panfil Y.E., Oded M., Banin U. // Angewandte Chemie International Edition. 2018. V. 57 P. 4274-4295.
4. Chen Y., et al // ACS applied materials & interfaces. 2020. V. 12. P. 25464-25470.
5. Matveev A.T., et al. // Ceramics International. 2020. V. 46. P. 19866-19872.

М.И. ПАУКОВ, А.А. БУДНИКОВ¹, А.Е. ГОЛЬДТ²,
Г.А. КОМАНДИН³, А.В. СЮЙ, Д.И. ЯКУБОВСКИЙ,
А.Г. НАСИБУЛИН², М.Г. БУРДАНОВА

Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет), Долгопрудный

¹*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

²*Сколковский институт науки и технологий*

³*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОТРУБОК НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДА И ДИСУЛЬФИДА ВОЛЬФРАМА

В данной работе показаны экспериментальные результаты электронной пропускающей и электронной сканирующей микроскопии, а также оптической, рамановской и терагерцовой спектроскопии нанотрубок (НТ) на основе углерода и дисульфида молибдена (WS_2). На основе измерений проведено сравнение свойств различных НТ. Показано, что оптические свойства одномерных (1D) материалов отличаются от их двумерных (2D) однослойных и многослойных аналогов.

M.I. PAUKOV, A.A. BUDNIKOV¹, A.E. GOLDT²,
G.A. KOMANDIN³, A.V. SYUY, D.I. YAKUBOVSKII,
A.G. NASIBULIN², M.G. BURDANOVA

Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

¹*Bauman Moscow State Technical University*

²*Skolkovo Institute of Science and Technology*

³*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*

COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF OPTICAL PROPERTIES OF NANOTUBES BASED ON CARBON AND TUNGSTEN DISULFIDE

This work presents the experimental results on transmission and scanning electron microscopy and Raman, optical and terahertz spectroscopy of nanotubes (NT) based on carbon and tungsten disulfide (WS_2). On the basis of the conducted measurements, the comparison of different NT is performed. It is also shown, that the optical properties of one-dimensional (1D) materials are different from their two-dimensional (2D) single and multilayer counterparts.

Исследование свойств одномерных (1D) материалов является одним из перспективных направлений современной науки и техники. Интерес

к 1D-материалам связан с отличными от двумерных (2D) материалов механическими и оптоэлектронными свойствами, возникающими из-за эффектов кривизны и квантового ограничения [1]. В данной работе использованы тонкие плёнки углеродных нанотрубок (УНТ), полученные методом аэрозольного синтеза, а также тонкие плёнки WS_2 нанотрубок (WS_2NT) компании NanoMaterials Ltd, полученные методом вакуумной фильтрации. Изображения пропускающей электронной микроскопии (ПЭМ) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) данных образцов представлены на рис. 1.

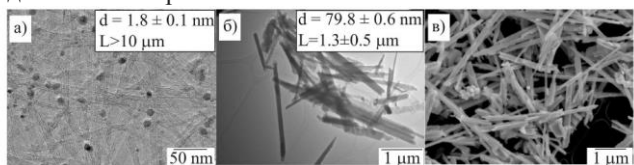


Рис. 1. ПЭМ-изображения плёнок УНТ (а) и WS_2NT (б), СЭМ-изображение плёнок WS_2NT (в)

В спектре поглощения УНТ наблюдаются пики, соответствующие экситонным переходам на длинах волн 2300, 1240 и 870 нм. В спектрах WS_2NT присутствуют пики на 670, 560 и 500 нм, которые также соответствуют прямым экситонным А, В и непрямоу С переходам. Рамановские спектры на длине волны лазера $\lambda = 532$ нм позволили выявить радиально-дышащие моды (РДМ) моды УНТ. Для WS_2NT характерны два пика, соответствующие продольным (E_{2g}^1) и поперечным (A_{1g}) фоновым колебаниям на частотах 417 и 351 cm^{-1} соответственно, что отличается от 2D WS_2 , что свидетельствует о влиянии кривизны НТ [2]. Увеличение действительной части терагерцовой проводимости УНТ в сторону более низкой частоты обусловлена вкладом от поглощения свободных носителей, описываемого моделью Друде, и аксиальных плазмонов, описываемых моделью Лоренца [1]. Проводимость WS_2NT , напротив, возрастает в сторону высоких частот, что свидетельствует о наличии аксиальных плазмонов с резонансной частотой в дальней или средней ИК-областях. Таким образом, было показано, что органические и неорганические НТ (на примере УНТ и WS_2NT) обладают общими для всех 1D-материалов оптоэлектронными свойствами.

Работа была выполнена при поддержке гранта РНФ № 21-79-10097.

Список литературы

1. Burdanova M.G., Tsapenko A.P., Kharlamova M.V., et al. // Adv. Optical Mater. 2021. P. 210104.
2. Wang F., Kinloch I., Wolverson D., et al. // 2D Mater. 2016. V. 4(1). P. 015007.

В.С. ПОПОВ^{1,2}, Н.А. ЛАВРЕНТЬЕВ^{1,2}, А.Е. МИРОФЯНЧЕНКО¹,
Е.В. МИРОФЯНЧЕНКО¹, В.П. ПОНОМАРЕНКО^{1,2}

¹Государственный научный центр РФ АО «НПО «Орион», Москва

²Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет), Долгопрудный

ДВУМЕРНЫЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ФОТОНИКИ НА ОСНОВЕ ТЕЛЛУРИДА ВИСМУТА

Приведены результаты исследования фотосенсорных и оптических свойств тонких плёнок из двумерных кристаллов теллурида висмута полученных методом эксфолиации в различных средах. Изучены зависимости свойств от условий получения двумерных кристаллов и тонких плёнок на их основе.

V.S. POPOV^{1,2}, N.A. LAVRENTYEV^{1,2}, A.E. MIROFYANCHENKO¹,
E.V. MIROFYANCHENKO¹, V.P. PONOMARENKO^{1,2}

¹State Research Center "Orion", Moscow

²Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

BISMUTH TELLURID 2D NANOSTRUCTURED MATERIALS FOR PHOTONICS

The results of a study of the photosensor and optical properties of thin films made of two-dimensional crystals of bismuth telluride obtained by exfoliation in various media are presented. The relationships between the properties of materials and the conditions for obtaining two-dimensional crystals and thin films have been established.

С момента вручения Нобелевской премии за открытие графена исследования, посвящённые исследованию методов получения и изучению свойств двумерных материалов различного состава, уделяется много внимания. Благодаря особенностям строения двумерные материалы могут обладать рядом свойств, востребованных при создании различных оптических и оптоэлектронных приборов. Двумерные материалы используются в качестве материалов прозрачных электродов, фоточувствительных материалов, материалов позволяющих управлять светом. Кристаллы теллурида висмута имеют слоистое строение (рис. 1) при котором, ван-дер-ваальсовыми связями соединены блоки (QL) по 5 слоёв Te-Bi-Te-Bi-Te соединённых между собой ковалентными связями [1, 2], что позволяет достаточно мягком ультразвуковом воздействии расслаивать кристаллы, давая тонкие пластинки теллурида висмута [3].

Подбор режимов эксфолиации и дисперсной фазы позволяет получать двумерные нанокристаллы отличающиеся по размерам и оптическим свойствам. Ранее материалы на основе теллурида висмута использовались в термоэлектрических охладителях, в то время как их применению в фотонике уделялось крайне мало внимания. Двумерное строение получаемых в работе нанокристаллов теллурида висмута (рис. 2) получило отражение в существенных отличиях полученных материалов и массивных кристаллов до эксфолиирования.

В работе приводятся результаты исследования фотосенсорных и оптических свойств тонких плёнок на ряде подложек, полученных путём нанесения суспензий двумерных кристаллов методами спин-коатинга и дип-коатинга. Полученные в работе плёнки демонстрируют широкоспектральный отклик на ИК-излучение ближнего и среднего диапазона, а также необычные оптические свойства.

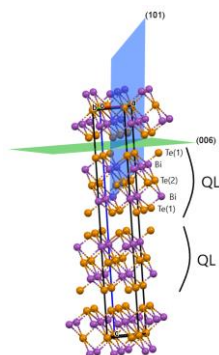


Рис. 1. Строение кристалла теллурида висмута смоделированное на основе данных из базы ICDD № 15–0863 (Bi_2Te_3)

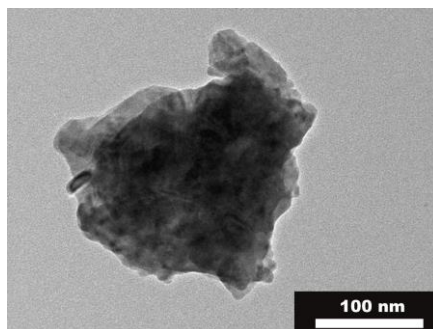


Рис. 2. Просвечивающая электронная микроскопия 2D-кристаллов теллурида висмута

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-20080.

Список литературы

1. Пономаренко В.П., Попов В.С. и др. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7 (1). С. 10.
2. Пономаренко В.П., Попов В.С., Попов С.В. // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8 (1). С. 33.
3. Попов В.С., Егоров А.В., Пономаренко В.П. // Прикладная физика. 2020. № 5. С. 50.

Д.И. ЯКУБОВСКИЙ, А.В. АРСЕНИН, Р.В. КИРТАЕВ,
М.С. МИРОНОВ, Ю.А. КЛИШИН, Н.В. ДОРОШИНА,
С.М. НОВИКОВ, В.С. ВОЛКОВ

*Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет), Долгопрудный*

БЛИЖНЕПОЛЬНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ МИКРОСКОПИЯ УЛЬТРАТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЁНОК НА ДВУМЕРНЫХ СЛОЯХ MoS₂

Слои двумерного дисульфида молибдена MoS₂ являются эффективным интерфейсом для создания ультратонких сплошных металлических плёнок. Характеризация оптических свойств таких плёнок толщиной несколько нанометров на областях порядка 10 мкм требует использования локальных измерительных методов. В работе представлена новая методика характеристики оптических свойств ультратонких плёнок золота, полученных на двумерном MoS₂, с помощью сканирующей ближнепольной оптической микроскопии.

D.I. YAKUBOVSKY, A.V. ARSENIN, R.V. KIRTAEV,
M.S. MIRONOV, Yu.A. KLISHIN, N.V. DOROSHINA,
S.M. NOVIKOV, V.S. VOLKOV

Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

SCANNING NEAR-FIELD OPTICAL MICROSCOPY OF ULTRA-THIN METAL FILMS ON 2D-LAYERS OF MoS₂

Layers of two-dimensional molybdenum disulfide MoS₂ are an efficient interface for the fabrication of ultrathin continuous metal films. Characterization of the optical properties of metal films with a thickness of several nanometers in surface areas of the order of 10 μm requires the use of local measurement methods. In this work, we studied the optical properties of ultrathin gold films obtained on two-dimensional MoS₂ using scanning near-field optical microscopy.

Ультратонкие металлические плёнки толщиной менее 10 нм, подобно двумерным материалам, являются важным элементом гибкой и прозрачной оптоэлектроники. Эффективные характеристики устройств, в которых используются прозрачные электроды на основе таких плёнок, напрямую зависят от морфологии, оптических и электрических свойств плёнок, и могут кардинально отличаться от свойств объёмного материала [1, 2]. Ранее было продемонстрировано, что использование интерфейса на

основе CVD-монослоя дисульфида молибдена (MoS_2) для осаждения золота приводит к формированию ультратонких и ультрагладких плёнок, обладающих высокой проводимостью и прозрачностью [3]. Использование флэйков MoS_2 , имеющих атомарно-гладкую поверхность, может улучшить свойства нанесённых на них металлических плёнок [4]. Однако, исследование оптического отклика плёнок, полученных на кристаллах MoS_2 размером порядка $10\text{ }\mu\text{м}$, требует использования высокочувствительных и локальных методик, одной из которых является сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия (СБОМ) [5]. В данной работе изучены оптические и структурные свойства ультратонких плёнок золота на двумерных флэйках MoS_2 , методами СБОМ, атомно-силовой и сканирующей электронной микроскопии (АСМ, СЭМ) и спектральной эллипсометрии.

Результаты СБОМ плёнки золота толщиной 4 нм на рис. 1а и 1б демонстрируют значительно большую интенсивность ближнего поля на участке Au-MoS_2 , по сравнению с Au-SiO_2 , что связано с различием в морфологии плёнок, показанной на рис. 1в. Полученные результаты СБОМ, диэлектрическая проницаемость и структурные свойства ультратонких плёнок золота на флэйках MoS_2 демонстрируют высокий оптический отклик, что является преимуществом для их применения в плазмонике и оптоэлектронике.

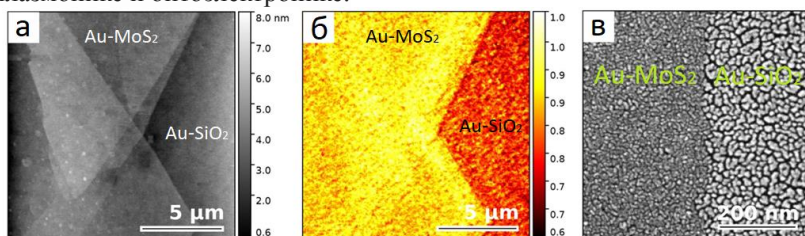


Рис. 1. АСМ-топография (а) и распределение интенсивности ближнего поля (б) плёнки золота 4 нм на двумерном флэйке MoS_2 , измеренные с помощью СБОМ, изображения СЭМ-плёнки золота 4 нм на границе раздела MoS_2 и SiO_2 (в)

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 21-72-10163).

Список литературы

1. Yakubovsky D.I., Stebunov Yu.V., et. al. // *Nanomaterials*. 2018. V. 8. P. 1058.
2. Volkov V.S., Yakubovsky D.I., et. al. // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2018. V. 1092. P. 012161.
3. Yakubovsky D.I., Stebunov Yu.V., et. al. // *Adv. Mater. Interfaces*. 2019. P. 190019.
4. Ottaviano L., Palleschi S., Perrozzi F., et. al. // *2D Mater.* 2017. V. 4. P. 045013.
5. Mastel S., Govyadinov A.A., Maissen C., et. al. // *ACS Photonics*. 2018. V. 5. P. 3372-3378.

И.В. МАРГАРЯН, А.А. БАБАЕВ, А.П. ЛИТВИН

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИЯ ПЕРОВСКИТНОГО СЛОЯ УГЛЕРОДНЫМИ ТОЧКАМИ

Приведены результаты экспериментов по формированию перовскитного слоя MAPbI_3 с использованием углеродных точек (УТ). Исследовано внедрение последних в перовскитный слой и их влияние на качество слоя перовскита. Изучены изменения в морфологии поверхности перовскитных слоёв с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) и оценены средние размеры зёрен.

I.V. MARGARYAN, A.A. BABAEV, A.P. LITVIN

ITMO University, Saint-Petersburg

PEROVSKITE FILM FUNCTIONALIZATION WITH CARBON DOTS

The results of experiments on the formation of the MAPbI_3 perovskite layer using carbon dots are presented. The introduction of the latter into the perovskite film and their influence on the quality of the perovskite layer are investigated. The morphology of the surface of the perovskite layers was studied using atomic force microscope and the average size of perovskite grains was estimated.

Перовскитные солнечные элементы (ПСЭ) привлекают большое внимание благодаря значительному прогрессу в эффективности преобразования солнечной энергии у таких устройств. Отличные характеристики ПСЭ обусловлены тем, что перовскитные материалы обладают преимуществом как органических, так и неорганических полупроводников, включая высокий коэффициент поглощения, высокую подвижность, большую длину диффузии носителей заряда, а также малую энергию связи экситона.

Тем не менее, требуются дополнительные усилия на пути к коммерциализации устройств на основе перовскита, так как в них все ещё присутствуют такие проблемы как энергетические потери на интерфейсах и деградация под воздействием излучения и влаги.

Наноструктурированные углеродные частицы с размерами 1 - 20 нм, такие как углеродные точки (УТ), могут обеспечить улучшение эксплуатационных характеристик ПСЭ при использовании в качестве вспомогательных компонентов. УТ влияют на размеры перовскитных

зерен, уменьшают миграцию ионов, пассивируют иодид свинца на границах зёрен перовскита [1, 2].

Целью работы является получение более качественных перовскитных слоёв путём добавления УТ в раствор прекурсора перовскита. На рис. 1 представлен ИК фурье-спектр УТ, использованных в экспериментах. Для получения УТ использовался фтороглюцинол, который являлся источником углерода и N-содержащий растворитель – диметилформамид (DMF). DMF обеспечивает легирование УТ атомами азота [3].

В эксперименте УТ в разных концентрациях были добавлены в раствор прекурсора перовскита и нанесены на стеклянную подложку. Полученные АСМ-изображения показывают, что размеры перовскитных зёрен растут при малых концентрациях УТ и начинают уменьшаться при дальнейшем увеличении концентрации. Данные о средних размерах представлены на рис. 2. Причиной данных изменений может являться то, что функциональные группы на поверхности УТ создают сильные связи с перовскитом, обеспечивая близкий контакт между зёрнами и более эффективную кристаллизацию при низких концентрациях УТ, и создают избыточные центры кристаллизации, приводящие к хаотичному образованию многочисленных кристаллов с меньшими размерами при высокой концентрации [4].

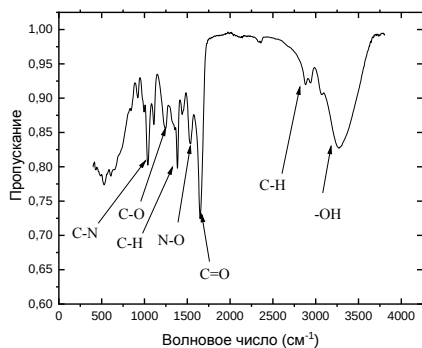


Рис. 1. ИК фурье-спектр УТ

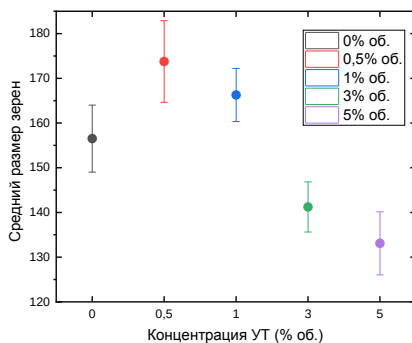


Рис. 2. Средний размер зёрен при разных концентрациях УТ

Список литературы

1. Litvin A.P., et. al. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. V. 124. P. 109774.
2. Zhang X., et. al. // Advanced Functional Materials. 2020. V. 30. No. 30. P. 1910530.
3. Khavlyuk P.D., et al. // Nanoscale. 2021. V. 13. No. 5. P. 3070-3078.
4. Zhang J., et al. // ACS Sustainable Chemistry & Engineering. 2018. V. 6. No. 7. P. 8631-8640.

А.И. ГАРИФУЛЛИН¹, Р.Х. ГАЙНУТДИНОВ^{1,2}, М.А. ХАМАДЕЕВ^{1,2}

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет

²Институт прикладных исследований АН Республики Татарстан, Казань

КВАНТОВО-ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ И УПРАВЛЕНИЕ ЧАСТОТАМИ ФОТОНОВ, ИЗЛУЧАЕМЫХ КВАНТОВОЙ ТОЧКОЙ

В данной работе показано, что в периодической среде фотонного кристалла происходит изменение электромагнитной массы помещённых в неё электронов. Этот эффект позволяет управлять энергетическими уровнями квантовой точки, находящейся в окружении фотонного кристалла. Изменение показателя преломления с помощью электрооптического эффекта Керра позволяет управлять частотами фотонов, излучаемых квантовой точкой, что необходимо для создания однофотонных источников с управляемой частотой генерируемых фотонов.

A.I. GARIFULLIN¹, R.Kh. GAINUTDINOV^{1,2}, M.A. KHAMADEEV^{1,2}

¹Kazan Federal University

²Institute of Applied Research of the Tatarstan Academy of Sciences, Kazan

QUANTUM ELECTRODYNAMIC EFFECTS IN PHOTONIC CRYSTALS AND CONTROLLABILITY OF FREQUENCIES OF PHOTONS EMITTED BY A QUANTUM DOT

In this paper, it is shown, that the electromagnetic mass of the electrons placed in the periodic medium of a photonic crystal changes. This effect allows you to control the energy levels of a quantum dot surrounded by a photonic crystal. Changing refractive index using the electro-optic Kerr effect allows you to control frequencies of photons emitted by a quantum dot that is necessary to create single-photon sources with a controlled frequency of generated photons.

Искусственные материалы, такие как фотонные кристаллы (ФК), являются перспективной средой для создания различных устройств фотоники [1] и для изучения квантово-электродинамических эффектов, таких как управление спонтанным излучением квантовых излучателей, помещённых в периодическую структуру ФК [2], усиление эффектов квантовой интерференции, создание тёмных состояний [3], управление массой электрона [4] и др. В работе [4] был предсказан эффект, заключающийся в том, что сильная модификация электромагнитного поля

в ФК приводит к значительному изменению взаимодействия электрона с собственным полем излучения, что выражается в существенном изменении электромагнитной массы заряженной частицы. Следствием этого эффекта является возможность управления энергетическими уровнями, энергией ионизации атомов в периодической среде ФК, а также частотами фотонов, излучаемых квантовыми точками (КТ).

Целью работы является развитие метода управления частотами фотонов, излучаемых КТ, помещённой в полости одномерного ФК.

Резкие резонансные пики в плотности фотонных состояний периодической среды ФК значительно влияют на взаимодействие электрона (экситона) КТ с собственным полем излучения. Мы построили спектры излучения одиночной КТ InAs/GaAs, помещённой на слой одномерного ФК на основе GaAs (рис. 1). Для решения этой задачи мы рассмотрели одноэлектронную КТ в *s*- и *p*-состояниях и рассчитали разность поправок к электромагнитной массе электрона КТ в данных состояниях в периодической структуре. Мы показываем, что на основе электрооптического эффекта Керра и эффекта изменения массы электрона в ФК появляется возможность управления уровнями энергии, соответственно, спектрами излучения естественных и искусственных атомов. Это может быть важно для создания однофотонных источников света с управляемой частотой фотонов, необходимых для генерации частотных кубитов [5].

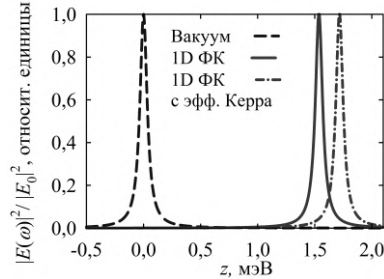


Рис. 1. Спектр излучения (лоренцевский контур) квантовой точки InAs/GaAs, помещённой в среду одномерного ФК на основе оптически плотных слоёв из GaAs

Список литературы

1. Sakoda K. Optical properties of photonic crystals. Berlin: Springer. 2001.
2. Wang W. et al. // Appl. Phys. Lett. 2019. V. 114. P. 021103.
3. Song G., Xu J., Yang Y. // Phys. Rev. A. 2014. V. 89. P. 053830.
4. Gainutdinov R.Kh., Khamadeev M.A., Salakhov M.Kh. // Phys. Rev. A. 2012. V. 85. P. 053836.
5. Chuprina I.N., Kalachev A.A. // Phys. Rev. A. 2019. V. 100. P. 043843.

Д.А. ЮРЧЕНКО¹, С.К. ЕВСТРОПЬЕВ^{2,3,4}, А.В. ШАШКИН³,
К.В. ДУКЕЛЬСКИЙ^{3,4,5}, Н.Б. КНЯЗЯН⁶, Г.Г. МАНУКЯН⁶,
В.Л. СТОЛЯРОВА^{1,7}

¹Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН, Санкт-Петербург

²Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)

³Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург

⁴Университет ИТМО, Санкт-Петербург

⁵Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

⁶Институт общей и неорганической химии НАН Армении, Ереван

⁷Санкт-Петербургский государственный университет

СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА Eu-СОДЕРЖАЩЕЙ СТЕКЛОКЕРАМИКИ BaO-Al₂O₃-SiO₂-MgF₂

Приведены результаты исследования спектральных свойств прозрачной стеклокерамики BaAl₂Si₂O₈, легированной Eu²⁺ и синтезированной традиционным методом плавления стекла. Выявлены условия процесса кристаллизации, при котором значительно увеличивается интенсивность синего излучения полученной стеклокерамики.

D.A. YURCHENKO¹, S.K. EVSTROPIEV^{2,3,4}, A.V. SHASHKIN³,
K.V. DUKELSKII^{3,4,5}, N.B. KNYAZYAN⁶, G.G. MANUKYAN⁶,
V.L. STOLYAROVA^{1,7}

¹Grebenshchikov Institute of Silicate Chemistry of the RAS, Saint-Petersburg

²Saint-Petersburg State Technological Institute (Technical University)

³S.I. Vavilov State Optical Institute, Saint-Petersburg

⁴ITMO University, Saint-Petersburg

⁵Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications

⁶Institute of General and Inorganic Chemistry of NAS of Armenia, Yerevan

⁷Saint-Petersburg State University

SPECTRAL PROPERTIES OF Eu-CONTAINING GLASS CERAMICS BaO-Al₂O₃-SiO₂-MgF₂

Presents the result of studying the spectral properties of transparent BaAl₂Si₂O₈ glass-ceramics doped with Eu²⁺ and synthesized by the traditional method of glass melting. The conditions of the crystallization process, at which the intensity of blue radiation of the obtained glass-ceramics significantly increases were determined.

Различные материалы, легированные Eu^{2+} , обладают высокими люминесцентными характеристиками и используются в различных оптических и оптоэлектронных приложениях [1, 2].

Целью данной работы является синтез и исследование прозрачной стеклокерамики $\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$, легированной Eu^{2+} .

Термическая обработка стекла с химическим составом, мол. %: SiO_2 – 58.80; BaO – 12.99; Al_2O_3 – 22.21; MgF_2 – 5.44, Eu_2O_3 – 0.56 в воздушной атмосфере приводит к образованию множества малых по объёмной доле кристаллических фаз. На рис. 1 представлены спектры фотолюминесценции (ФЛ) исходной стеклокерамики, на которых видно, что ионы Eu представлены в двух валентных состояниях (Eu^{2+} и Eu^{3+}). На рис. 2 представлены спектры ФЛ исходного стекла и образцов стекла после ТО, исходя из анализа которых, можно утверждать, что в процессе кристаллизации материала ионы Eu^{3+} восстанавливаются, образуя Eu^{2+} , который внедряется в нанокристаллы, что значительно (более чем в два раза) увеличивает интенсивность синего излучения полученной стеклокерамики.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований и Комитетом науки Республики Армения (проект № 20-53-05013).

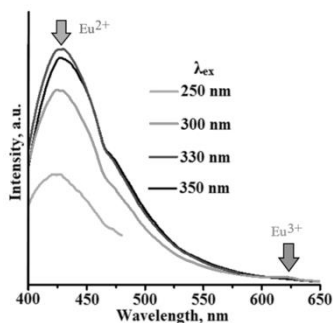


Рис. 1. Спектры ФЛ исходного стекла при УФ-облучении

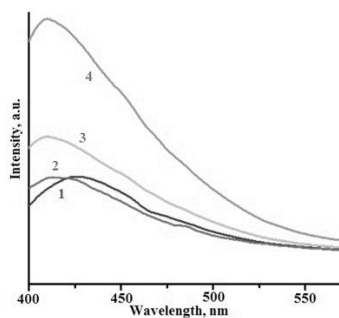


Рис. 2. Спектры ФЛ исходного стекла и образцов стекла после ТО:
кривая 1 – исходное стекло; кривая 2 – 750 °C;
кривая 3 – 800 °C; кривая 4 – 1000 °C

Список литературы

1. Rohwer L.S., Srivastawa A.M. // *Electrochemical Society Interface*. 2003. V. 12 (2). P. 36-39.
2. Shinozaki K. // *Journal of the Ceramic Society of Japan*. 2018. V. 126 (9) P. 684-692.

В.С. ЖИГАРЬКОВ, Н.В. МИНАЕВ, В.И. ЮСУПОВ

*Институт фотонных технологий
ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Троицк*

ФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО ПЕРЕНОСА ЖИВЫХ КЛЕТОК В ГЕЛЕВЫХ МИКРОКАПЛЯХ

Представлен обзорный доклад, посвящённый циклу работ, связанных с особенностями переноса гелевых микрокапель, содержащих живые клетки, методом LIFT (laser-induced forward transfer) на примере реализованного подхода лазерной инженерии микробных систем (ЛИМС). Была произведена отладка экспериментальной лазерной системы под задачи по пространственному переносу гелевых микрокапель с целью оценки и минимизации возможного негативного воздействия на биологические микрообъекты.

V.S. ZHIGARKOV, N.V. MINAEV, V.I. YUSUPOV

Institute of Photon Technologies of FSRC «Crystallography and Photonics» RAS, Troitsk

PHYSICAL ASPECTS OF LASER-INDUCED LIVING CELL TRANSFER IN GEL MICRODROPLETS

A review report based on a series of works on the features of the transfer of gel microdroplets containing living cells by the LIFT method (laser-induced forward transfer). In this work, the practical implementation of the method was achieved through an approach called laser engineering of microbial systems (LEMS). The experimental laser system was optimised for the tasks of the spatial transfer of gel microdroplets in order to assess and minimize the possible negative impact on biological micro-objects.

Перенос фрагментов тонкой металлической плёнки на акцепторную мишень под действием импульсного лазерного излучения впервые был продемонстрирован в середине восьмидесятых годов прошлого века [1]. Впоследствии метод был назван лазерно-индуцированным прямым переносом вещества – LIFT. В настоящее время возможности LIFT используются для целого ряда высокотехнологичных приложений, требующих, в частности, перенос и осаждение крайне хрупких и чувствительных материалов (органических тонкоплёночных резисторов, органических светодиодов, порошковых люминофоров для дисплеев высокого разрешения и т.д.).

Также LIFT применяется для переноса и осаждения биочернил на основе гидрогелей, содержащих различные биоматериалы: белки, молекулы ДНК, бактериальные и стволовые клетки [2]. Отдельный подход LIFT, названный лазерной инженерией микробных систем (ЛИМС), связан с микробиологическими задачами и направлен на увеличение разнообразия культивируемых микроорганизмов [3].

Механизм процесса переноса заключается в том, что лазерное излучение, сфокусированное на поглощающей металлической плёнке, на которой распределён гель с клетками, приводит к нагреванию плёнки и возникновению быстро расширяющегося парогазового пузыря, при расширении которого возникают микроструи жидкости [3, 4]. Таким образом удаётся переносить малое количества геля, содержащего одиночные клетки. Однако существует ряд ограничений, который необходимо принимать во внимание в процессе переноса биологических объектов [5]: в области лазерного воздействия возникают ударные и акустические волны [6, 7], достигаются высокие температуры, развиваются большие ускорения гелевых струй, из-за разрушения поглощающей плёнки вместе с каплями переносятся металлические наночастицы [8], которые могут оказывать цитотоксическое воздействие. Кроме того, при работе с живыми клетками необходимо учитывать условия окружающей среды, в которой осуществляется процесс переноса.

В работе была исследована экспериментальная лазерная система, позволяющая осуществлять перенос биологических клеток в гелевых микрокаплях как в аэробных, так и в анаэробных условиях. Полученные результаты направлены на уточнение взаимодействия излучения с материалом плёнки и геля, а также и с биологическими микрообъектами.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках исполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части разработки экспериментальной лазерной системы, гранта РНФ 20-14-00286 в части оптимизации ЛИМС.

Список литературы

1. Bohandy J., et al. // Appl. Phys. 1986. V. 60. № 4. P. 1538-1539.
2. Arnold C.B., et al. // MRS Bull. 2007. V. 32. № 1. P. 23-31.
3. Yusupov V.I., et al. // Laser Phys. Lett. 2018. V. 15. № 6. P. 065604.
4. Unger C., et al. // Appl. Phys. A Mater. Sci. Process. 2011. V. 103. № 2. P. 271-277.
5. Zarubin V.P., et al. // Quantum Elec. 2019. V. 49. № 11. P. 1068.
6. Zhigarkov V.S., Yusupov V.I. // Opt. Laser Technol. 2021. V. 137. P. 106806.
7. Mareev E., et al. // Photonics. 2021. V. 8. № 9. P. 374.
8. Zhigarkov V., et al. // Nanomaterials. 2021. V. 11. № 10. P. 2584.

К.В. ЛЬВОВ¹, С.Ю. СТРЕМОУХОВ^{1,2}, Ф.В. ПОТЕМКИН¹

¹*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

²*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва*

ДИНАМИКА СВОБОДНЫХ НОСИТЕЛЕЙ В ОБЪЁМЕ КРЕМНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Приведены результаты численного моделирования динамики свободных носителей в зоне проводимости при воздействии фемтосекундного лазерного излучения среднего ИК-диапазона (4.6 мкм) на кристалл Si. Показана необходимость нагрева электронов в зоне проводимости до энергий, существенно превышающих ширину запрещённой зоны, а также создание надкритической концентрации носителей для достижения энергетического порога плавления кристаллической решётки кремния.

K.V. LVOV¹, S.Yu. STREMOUKHOV^{1,2}, F.V. POTEMKIN¹

¹*Lomonosov Moscow State University*

²*National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow*

DYNAMICS OF FREE CARRIERS IN BULK OF SILICON UNDER THE ACTION OF FEMTOSECOND LASER RADIATION

The results of numerical simulation of the free carrier dynamics in the conduction band under the action of mid-IR (4.6 μm) femtosecond laser radiation on a bulk of Si are presented. To achieve the energy threshold for melting the silicon crystal lattice, the necessity of electron heating up to energies significantly exceeding the band gap is shown, as well as the creation of a supercritical carrier density.

Создание структурных изменений в объёме твёрдого тела под воздействием фемтосекундного лазерного излучения связано с процессами возбуждения электронной подсистемы и последующей передачи этого возбуждения кристаллической решётке материала. Благодаря фемтосекундной длительности возбуждающего излучения, можно считать, что энергия, поглощённая электронной подсистемой, полностью передаётся кристаллической решётке по окончании лазерного воздействия. Поэтому для осуществления структурных изменений необходимо достигнуть объёмной плотности энергии свободных

носителей выше энергетического порога плавления кристаллической решётки [1 - 3].

В данной работе проводится моделирование динамики плотности свободных носителей в объёме кремния с помощью многоскоростного уравнения (MRE) [4]. В расчётах использовалось импульсное лазерное излучение длительности 120 фс с длиной волны 4.6 мкм. Флюенс изменялся в пределах от 0.01 до 0.10 Дж/см².

В инфракрасном диапазоне скорость однофотонного поглощения в зоне проводимости оказывается сравнимой со скоростью ударной ионизации, что приводит к большему нагреву свободных носителей. Объёмная плотность поглощённой энергии определяется шириной запрещённой зоны, созданной концентрацией свободных носителей, а также набранной энергией под воздействием лазерного излучения. Поскольку кремний является узкозонным полупроводником (ширина запрещённой зоны равна 1.12 эВ), то достижение порога объёмной плотности поглощённой энергии (4.2 кДж/см³) становится возможным при увеличении средней тепловой энергии свободных носителей.

В работе показано, что при скорости однофотонного поглощения в зоне проводимости 0.01 фс⁻¹ (что соответствует наблюдаемым экспериментальным результатам) энергетический порог плавления кристаллической решётки достигается при флюенсах лазерного излучения выше 0.072 Дж/см². При этом во время действия лазерного излучения средняя тепловая энергия электронов достигает значения 8 эВ, а после лазерного воздействия создаётся плотность свободных носителей $8.5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$, что превышает критическую плотность для длины волны 4.6 мкм в 170 раз. Столь высокая степень ионизации свидетельствует об экстремальном состоянии вещества при осуществлении структурных изменений в объёме кремния путём лазерного импульсного воздействия.

Список литературы

1. Mareev E.I., Lvov K.V., Rumiantsev B.V., et. al. // Laser Phys. Lett. 2020. V. 17. P. 015402.
2. Zavedeev E.V., Kononenko V.V., Konov V.I. // Laser Phys. 2016. V. 26. P. 016101.
3. Chambonneau M., Grojo D., Tokel O., et. al. // Laser Photonics Rev. 2021. P. 2100140.
4. Rethfeld B. // Phys. Rev. B. 2006. V. 73. P. 035101.

А.В. ТРИФОНОВА, Р.В. РЯМБОВ

Национальный исследовательский Томский государственный университет

**БЕЗРЕЗОНАТОРНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ В РАСТВОРАХ
ОРГАНИЧЕСКОГО КРАСИТЕЛЯ С НАНОЧАСТИЦАМИ
ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ НАНО- И ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ
ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ**

Экспериментально определены пороги вынужденного излучения в растворах органического красителя кумарин-30 с наночастицами ZnO с концентрацией 0,625 % объёмных долей при нано- и фемтосекундной накачке. Порог вынужденного излучения с использованием наносекундных и фемтосекундных лазерных импульсов равен $0,01 \cdot 10^8$ и $13 \cdot 10^8$ Вт/см² соответственно.

A.V. TRIFONOVA, R.V. RYAMBOV

National Research Tomsk State University

**RESONATOR-FREE LASER GENERATION
IN SOLUTIONS OF AN ORGANIC DYE
WITH NANOPARTICLES AT EXCITATION
BY NANO- AND FEMTOSECOND LASER PULSES**

The thresholds of stimulated emission were experimentally determined in solutions of the organic dye coumarin-30 with ZnO nanoparticles with a concentration of 0.625 % by volume under nano- and femtosecond pumping. The threshold for stimulated emission using nanosecond and femtosecond laser pulses is $0.01 \cdot 10^8$ and $13 \cdot 10^8$ W/cm², respectively.

На данный момент в направлении стохастических лазеров активно рассматриваются различные варианты импульсной накачки. Ранее в своих экспериментах [1] мы использовали в качестве накачки наносекундный твердотельный лазер. И при достижении достаточно высоких энергий накачки наблюдалось взрывное вскипание растворов и их разрушение. Это наводит на мысли о том, что было бы предпочтительно использовать в качестве накачки излучение, которое в меньшей степени воздействует на органические вещества. Таким излучением может являться излучение фемтосекундной длительности.

Однако исходя из работ [2, 3] были обнаружены противоречия полученных теоретических и экспериментальных результатов. Так, из экспериментальной работы [2] известно, что пороги вынужденного

излучения при фемтосекундной накачке на два порядка меньше, чем при наносекундной, а в теоретической работе [3] показано, что порог стохастической генерации обратно пропорционален длительности импульса накачки. В связи с этим противоречием была проведена данная работа. Серия экспериментов проводилась на установке, представленной на рис. 1. В результате были получены зависимости величины напряжения электрического тока ФЭУ от плотности мощности фемтосекундного (рис. 2) и наносекундного (рис. 3) лазерного импульса накачки.

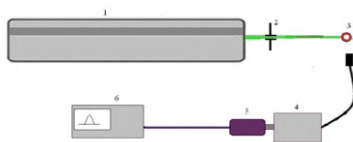


Рис. 1. Схема установки: 1 – Ti:Sa (или Nd:Yag) лазер, 2 – диафрагма, 3 – капля с активной средой, 4 – монохроматор, 5 – ФЭУ, 6 – осциллограф

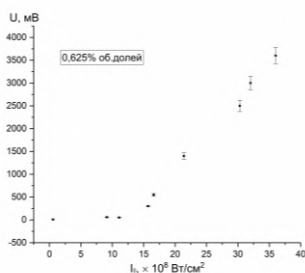


Рис. 2. Зависимость величины сигнала ФЭУ от плотности мощности фемтосекундного лазерного импульса накачки

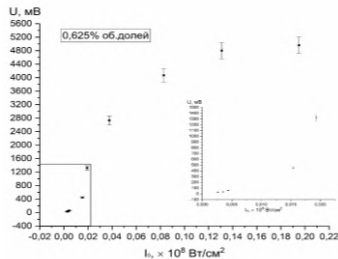


Рис. 3. Зависимость величины сигнала ФЭУ от плотности мощности наносекундного лазерного импульса накачки

В результате были получены величины порогов вынужденного излучения в капле красителя кумарин-30 с наночастицами ZnO с концентрацией 0,625 % объёмных долей при нано и фемтосекундной накачке, равные 0,001 и 1.3 МВт/см², соответственно.

Список литературы

1. Donchenko V.A., Zemlyanov A.A., et al. // Proc. SPIE. 2018. V. 10833. P. 108332C.
2. Drane T.M., Bach H., Shapiro M., Milner V. // Optical Society of America. 2015. V. 6. No. 5. P. 1885-1894.
3. Бочкарев Н.Н., Донченко В.А., Землянов А.А и др. // Известия вузов. Физика. 2005. Т. 18. № 4. С. 15-19.

Н.А. АФАНАСЬЕВ, М.К. МОСКВИН, Е.В. ПРОКОФЬЕВ,
Г.В. ОДИНЦОВА

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

**ВЛИЯНИЕ ЭЛЛИПТИЧНОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА УПОРЯДОЧЕННОСТЬ
ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ
ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР**

При формировании лазерно-индуцированных поверхностных периодических структур (ЛИППС) поляризация излучения является важным параметром, от которого зависит итоговая картина. В работе продемонстрировано влияние различных типов поляризации лазерного излучения наносекундной длительности с длиной волны 1,064 мкм на упорядоченность ЛИППС.

N.A. AFANASIEV, M.K. MOSKVIN, E.V. PROKOFIEV,
G.V. ODINTSOVA

ITMO University, Saint-Petersburg

**INFLUENCE OF ELLIPTICITY OF LASER RADIATION
POLARIZATION ON VARIATION OF THE ORIENTATION
ANGLE OF LASER-INDUCED SURFACE PERIODIC
STRUCTURES**

In the formation of laser-induced periodic surface structures (LIPSS), radiation polarization is an important parameter on which the final picture depends. The work demonstrates the effect of various types of polarization of laser radiation of nanosecond duration with a wavelength of 1.064 μm on the ordering of LIPSS.

Лазерно-индуцированные периодические поверхностные структуры (ЛИППС) представляют собой универсальное явление, которое происходит на твёрдых телах при облучении лазерным излучением. ЛИППС обычно представляют собой рельеф поверхности, состоящий из периодических линий, которые демонстрируют чёткую корреляцию с длиной волны и поляризацией излучения [1]. Форма и упорядоченность структур зависят от параметров воздействующего лазерного излучения (мощность, длина волны, частоты, длительность и количество импульсов). На форму (появление ветвлений) и упорядоченность так же влияет поляризация падающего излучения [2].

Целью работы являлось экспериментальное исследование формирования структур ЛИППС при различной эллиптичности поляризации лазерного излучения на поверхности нержавеющей стали AISI 304. Формирование структур проводилось с помощью импульсного иттербиевого лазера наносекундной длительности с длиной волны 1,064 мкм ($P = 3$ Вт, $f = 10$ кГц, $t = 100$ нс). Лазерное излучение фокусировалось объективом плоского поля с фокусным расстоянием 216 мм в фокусное пятно диаметром 45 мкм.

Показано, что формирование структур происходит перпендикулярно длинной оси эллипса поляризации. По мере увеличения эллиптичности происходит уменьшение упорядоченности структур, ориентированных перпендикулярно длинной оси эллипса поляризации и увеличивается количество пересечений структур (ветвлений). При линейной поляризации (эллиптичность излучения равна 1) ветвлений нет или их количество мало, около 10 (для параметров лазерного излучения, используемых в работе), структуры выглядят как упорядоченные параллельные линии. При уменьшении эллиптичности происходит увеличение количества ветвлений, упорядоченность структур снижается и исчезает при круговой поляризации (эллиптичность излучения равна 0) (рис. 1). Зависимость количества сформированных ветвлений от эллиптичности поляризации представлена на рис. 2.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, проект № 21-79-10241.

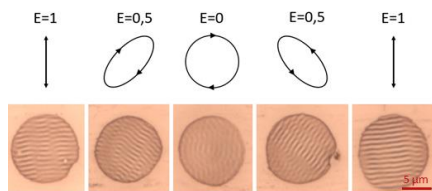


Рис. 1. Формируемые структуры различной эллиптичностью поляризации лазерного излучения, диаметры пятен ≈ 10 мкм

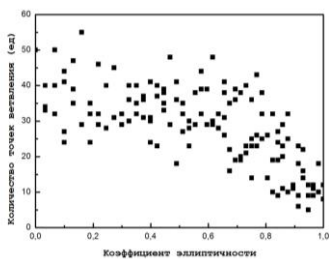


Рис. 2. Зависимость количества сформированных ветвлений от эллиптичности поляризации

Список литературы

1. Bonse J., et. al. // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2016. V. 23. No. 3. P. 9000615,
2. Juergen R., et. al. // Appl Phys A. 2008. P. 1019-1024.

А.Д. ФРАНК^{1,2}, В.С. ЖИГАРЬКОВ², В.С. ЧЕПЦОВ^{1,3},
Н.В. МИНАЕВ², В.И. ЮСУПОВ²

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

²Институт фотонных технологий

ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Троицк

³Институт космических исследований РАН, Москва

ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫЙ ПЕРЕНОС ЭУКАРИОТИЧЕСКИХ МИКРООРГАНИЗМОВ В ГЕЛЕВЫХ МИКРОКАПЛЯХ

Представлены экспериментальные результаты исследования влияния аффинитета и наличия капсул у нескольких штаммов дрожжей при прямом лазерно-индуцированном переносе (LIFT) с использованием тонкого поглощающего покрытия на основе титана. Установлены особенности, которые влияют на рост дрожжей при использовании LIFT.

A.D. FRANK^{1,2}, V.S. ZHIGARKOV², V.S. CHEPTCOV^{1,3},
N.V. MINAEV², V.I. YUSUPOV²

¹Lomonosov Moscow State University

²Institute of Photon Technologies of FSRC «Crystallography and Photonics» RAS, Troitsk

³Space Research Institute of the RAS, Moscow

EUKARYOTIC MICROORGANISMS LASER INDUCED TRANSFER IN GEL MICRODROPLETS

The experimental results of studying the effect of affinity and the capsules presence in several yeasts strains after laser-induced forward transfer (LIFT) using a thin absorbing titanium coating are presented. The features that affect the growth of yeast using the LIFT have been revealed.

Некоторые виды дрожжей с давних пор используются, например, при изготовлении хлеба, кваса, спиртных напитков. В настоящее время их также применяют в качестве пищевых добавок, лекарственных препаратов и БАД. Кроме того, дрожжи являются удобным модельным объектом. Многие данные по цитологии, биохимии и генетике эукариот были впервые получены на дрожжах рода *Saccharomyces*. Для генетических исследований важен короткий жизненный цикл дрожжей и возможность быстрого получения большого числа их особей и поколений, что позволяет изучать даже очень редкие явления.

Метод LIFT используется для пространственного переноса широкого спектра материалов в твёрдой и жидкой фазах с высоким разрешением, включая клеточные и биомолекулярные структуры. Объём капель гидрогеля может составлять десятки пиколитров [1], поэтому, например, LIFT применяется для создания микробных биосенсоров [2] и для выделения бактерий из различных сложных субстратов [3].

Для каждого из штаммов дрожжей был проведён лазерный перенос гелевых микрокапель (на основе гиалуроновой кислоты) на плотные питательные среды в чашки Петри в градиенте концентраций клеток. Для этого были использованы базидиомицеты и аскомицеты, образующие и не образующие капсулы – по два штамма для каждой комбинации факторов, для оценки влияния видовых особенностей. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. На рис. 2 показаны изображения гидрогелевых капель с клетками на подложке. Кроме того, для сравнения, были произведены посевы из тех же гелей обычными методами и посевы без гелей (из исходных суспензий), для того, чтобы исключить влияние гиалуроновой кислоты на рост дрожжей. В результате было установлено, какие особенности влияют на рост дрожжей при использовании LIFT.

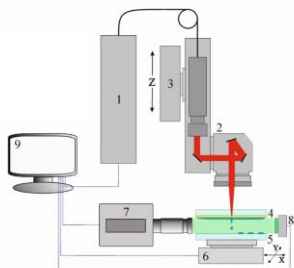


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки

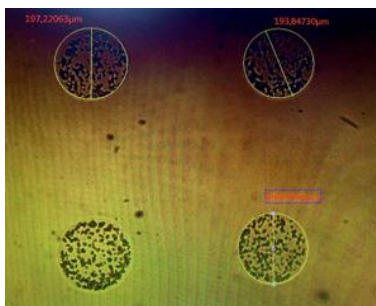


Рис. 2. Гидрогелевые капли с клетками на подложке

Список литературы

1. Yusupov V., et al. Laser-induced forward transfer hydrogel printing: A defined route for highly controlled process // Int. J. Bioprinting. 2020. V. 6. № 3. P. 1-16.
2. Chatzipetrou M., et al. Applied surface science biosensors by means of the laser induced forward transfer technique // Appl. Surf. Sci. 2013. V. 278. P. 250-254.
3. Gorlenko M.V., et al. Laser microsampling of soil microbial community // J. Biol. Eng. 2018. V. 12.

К.А. ЕГОРОВА, А. КОЗИНА, С.Ю. ПЕРЕПЕЛКИНА, Д.А. СИНЕВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

УПРАВЛЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬЮ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ АДДИТИВНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Проведено исследование влияния слоёв вспомогательных веществ (порошка графита) на процесс лазерной обработки поверхностного слоя титана. Приведены результаты изменения микротвёрдости образцов в зависимости от параметров лазерного воздействия. Предложен и апробирован метод повышения микротвёрдости поверхностного слоя за счёт аддитивной лазерной обработки под слоем графитного порошка в сжатых условиях в контакте со вспомогательным прозрачным диэлектрическим покрытием.

X.A. EGOROVA, A. KOZINA, S.Yu. PEREPELKINA, D.A. SINEV
ITMO University, Saint-Petersburg

WEAR RESISTANCE CONTROL OF TITANIUM ALLOYS BY ADDITIVE LASER TREATMENT

The influence of layers of additional substances (graphite powder) on the process of laser treatment of the surface layer of titanium has been studied. The results of measuring the microhardness of samples depending on the parameters of laser exposure are presented. A method of increasing the microhardness of the surface layer due to additive laser treatment under a layer of graphite powder under compressed conditions in contact with a transparent dielectric coating is proposed and tested.

На данный момент методы аддитивной лазерной обработки являются ведущими направлениями в развитии материаловедения, благодаря достижению высокого уровня механических и функциональных свойств итогового изделия за счёт высоких пространственных и временных градиентов температуры. Наибольший интерес представляет получение новых свойств материалов путём модификации поверхности с помощью лазерного воздействия под слоем вспомогательных веществ [1]. Методы, представленные на сегодняшний день, не позволяют формировать области с однородным распределением механических свойств по поверхности и не обеспечивают высокой воспроизводимости результатов [2, 3]. В литературе, посвящённой альтернативным (нелазерным) методам

отмечена проблема их применения в промышленных масштабах, ввиду многостадийности и низкой производительности [3, 4].

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование возможности управления параметрами поверхностных лазерно-индуцированных микроструктур методом аддитивной лазерной обработки под слоями вспомогательных веществ при воздействии лазерного излучения коммерчески доступной лазерной установки Минимаркер-2.

Для сравнительного анализа влияния слоя графита на результат лазерной обработки были проведены серии экспериментов, в которых обработка производилась путём записи структуры непосредственно на предварительно сформированную лазерно-индуцированную оксидную плёнку, либо при обработке под слоем графита. Для предотвращения удаления графитного слоя было использовано стекло, которое было закреплено для устранения сдвига во время обработки, а также для фиксирования графитового порошка в сжатых условиях.

На полученных массивах микроструктур было проведено испытание образцов на микротвёрдость с помощью микротвердомера ПТМ-3М путём нанесения отпечатка по методу Виккерса на испытываемую поверхность образца под действием статической нагрузки.

В ходе выполнения работы были разработаны технологические карты лазерного воздействия, в которых продемонстрировано резкое (не менее чем в 10 раз) и однородное по поверхности повышение микротвёрдости поверхностного слоя титановых образцов, по сравнению с исходной поверхностью.

Авторы благодарят за поддержку программу организации и проведения научной подготовки бакалавров, магистрантов и аспирантов в рамках выполнения научно-исследовательских работ на базе Физико-технического мегафакультета Университета ИТМО.

Список литературы

1. Flower H.M., Walker A., West D.R.F. The structure of Ti-6Al-4V laser alloyed with carbon // Scripta Metallurgica. 1985. V. 19. P. 923-926.
2. Saleh A.F., Abboud J.H., Benyounis K.Y. Surface carburizing of Ti-6Al-4V alloy by laser melting // Optics and Lasers in Engineering. 2010. V. 48. No. 3. P. 257-267.
3. Yamaguchi T., Hagito H., Takemura M., Nakahira A. Formation and microstructural characterization of Ti/TiC surface composite layer by laser alloying treatment using graphite powder // J. Jpn. Soc. Powder Metallurgy. 2014. V. 61. No. 10. P. 481-486.
4. Быстров Ю.А., Ветров Н.З., Лисенков А.А.. Плазмохимический синтез карбида титана на медных подложках // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. № 15. С. 33-39.
5. Zarrinfar N., Shipway P.H., Kennedy A.R., Saidi A.. Carbide stoichiometry in TiC and Cu-TiC_x produced by self-propagating high-temperature synthesis // Scripta Materialia. 2002. V. 46. P. 121-126.

К.Н. БЕЛОВ¹, Л.И. ДЁМИНА¹, Д.А. ЖЕРЕБЦОВ², М.Г. ИВАНОВ²,
Н.Д. КУНДИКОВА^{1,2}

¹Южно-Уральский государственный университет, Челябинск

²Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ЛАЗЕРНОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ Yb:YAG, Yb:LuAG, Pr:LuAG – ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДОВ

Приведены результаты экспериментов по исследованию микроструктуры лазерных керамик с использованием методов: сканирующей электронной, оптической микроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния, определены наиболее оптимальные для каждого образца.

K.N. BELOV¹, L.I. DEMINA¹, D.A. ZHEREBTSOV², M.G. IVANOV²,
N.D. KUNDIKOVA^{1,2}

¹South Ural State University, Chelyabinsk

²Institute of Electrophysics of the Ural Branch of the RAS, Ekaterinburg

STUDY OF THE MICROSTRUCTURE OF LASER CERAMICS Yb:Yag, Yb:LUAG, Pr:LuAG – POSSIBILITIES OF METHODS

The results of experiments on the study of the microstructure of laser ceramics using methods: scanning electron, optical microscopy, Raman spectroscopy, the most optimal for each sample are determined.

Эффективность генерации лазерного излучения в оптической керамике зависит от дефектов и от технологического процесса на разных этапах её синтеза. Светорассеяние зависит от среднего размера зерна поликристаллической структуры. Для определения микроструктуры оптической лазерной керамики в [1] предложен метод комбинационного рассеяния света, сканирующей электронной и оптической микроскопии [2] для 1 at% Nd:YAG.

Цель настоящей работы – определение структуры лазерных керамик 3 at% Yb:LuAG, 3 at% Yb:YAG, 0.5 at% Pr:LuAG различными методами.

В спектре комбинационного рассеяния керамики 3 at% Yb:LuAG. интересен диапазон от 365 до 405 см⁻¹. В этом диапазоне располагаются два пика, которые анализировались по значениям центра-масс интенсивности после получения спектров на заданной поверхности. Наблюдались контрастные пятна, соответствующие разным зёрнам, показывающие поликристаллическую структуру лазерной керамики. Их

появление связано с различными значениями центра-масс интенсивности указанных пиков, полученных на поверхностях разных зёрен. Таким образом, методом комбинационного рассеяния показано, что средний размер зёрен лазерной керамики 3 at% Yb:LuAG составляет примерно 20 мкм, в разных зёрнах наблюдается сегрегация легирующей примеси.

На рис. 1 представлено СЕМ-изображение поверхности керамики Pr:LuAG при увеличении в 100 раз, на рис. 2 – изображение поверхности керамики Pr:LuAG при увеличении в 300 раз в оптический микроскоп. На рис. 3 показано изображение комбинационного рассеяния керамики Pr:LuAG: в диапазоне от 0 до 1000 см^{-1} размером 85×85 мкм, на рис. 4 приведено изображение поверхности керамики 0,5Pr:LuAG, полученное с помощью СЕМ при 20 В с увеличением в 1200 раз.

Методами комбинационного рассеяния и электронной микроскопии показано наличие сегрегации внутри зёрен, на границах зёрен сегрегации не обнаружено. Все три метода показали, что средний размер зёрен лазерной керамики 3 at% Yb:YAG примерно 40 мкм. Все три метода позволяют увидеть кристаллиты, их средний размер около 10 мкм. Спектроскопия комбинационного рассеяния и электронная микроскопия показывают, что интенсивность рассеяния на зёрнах меньше, чем их границы, что свидетельствует о сегрегации легирующего иона.

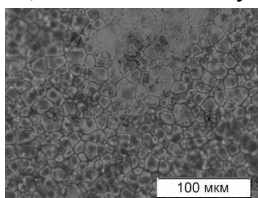


Рис. 1. СЕМ-изображение поверхности керамики Pr:LuAG

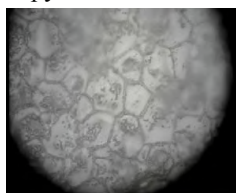


Рис. 2. Изображение поверхности керамики Pr:LuAG

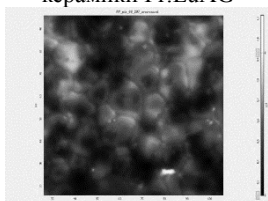


Рис. 3. Изображение комбинационного рассеяния керамики Pr:LuAG

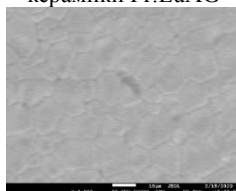


Рис. 4. Изображение поверхности керамики 0,5Pr:LuAG

Список литературы

1. Ramirez M.O., et al. // Opt. Express. 2008. V. 16. No. 9. P. 5965.
2. Fu Y., et al. // Opt. Mater. (Amst). 2017. V. 71. P. 90-97.

Е.В. ПРОКОФЬЕВ, Н.А. АФАНАСЬЕВ, М.К. МОСКВИН

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ФОРМИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ВИЗУАЛЬНЫХ ЭФФЕКТОВ ЗА СЧЁТ ЛАЗЕРНОГО СТРУКТУРИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ

В работе рассмотрена маркировка поверхности нержавеющей стали за счёт лазерно индуцированных поверхностных периодических структур (ЛИПСС). Показана возможность создания различной динамики изображений, которая была достигнута только за счёт изменения поляризации лазерного излучения и траектории сканирования. Реализовано создание поверхностных периодических структур периодом порядка 1 мкм со сложной формой записи (окружности, векторные изображения) и контролируемым направлением визуально наблюдаемого градиента цвета поверхности. Структурирование производилось с помощью импульсного волоконного лазера с длиной волны 1,06 мкм.

E.V. PROKOFIEV, N.A. AFANASIEV, M.K. MOSKVIN

ITMO University, Saint-Petersburg

FORMATION OF DYNAMIC VISUAL EFFECTS USING LASER STRUCTURING OF METAL SURFACES

We report stainless steel surface marking by laser-induced surface periodic structures. The ability to create different dynamics of images was implemented. It was achieved only by changing the polarization of the incident radiation and the scanning trajectory. The surface periodic structures of a period of $\sim 1 \mu\text{m}$ with a complex form of recording (circles, vector images) and controlled direction of a visually observable diffractive color gradient were carried out.

Модификация поверхности при помощи импульсного лазерного воздействия позволяет формировать структурную окраску на широком спектре материалов. Формирование цвета на поверхности материалов возможно за счёт создания различных структурных форм на поверхности материалов [1, 2]. Подходы к формированию цвета можно разделить на две основные группы по физическим эффектам: интерференция и дифракция [3].

Целью работы являлось экспериментальное исследование формирования ЛИПСС на поверхности нержавеющей стали AISI 304.

Исследование проводилось на импульсном наносекундном иттербиевом волоконном лазере с длиной волны 1,06 мкм.

Для управления поляризацией в систему дополнительно были установлены линейный поляризатор (призма Глана-Тейлора) и полуволновая пластина. Были сформированы ЛИППС на поверхности нержавеющей стали AISI 304. Период данных структур составлял 1 мкм. Для формирования визуальных эффектов была произведена синхронизация изменения поляризации лазерного излучения со скоростью сканирования. Что было реализовано через построение матрицы сканирования X/Y с присваиванием каждому элементу матрицы значения поворота поляризации (рис. 1). Запись структур производилась как при линейном, так и радиальном сканировании (рис. 2).

При изменении направления поляризации во время сканирования, направления структур плавно изменялись в соответствии с заранее заданной матрицей. При изменении угла наблюдения и угла падения, визуально наблюдаемый цвет также смещался в соседнее местоположение по направлению X в соответствии с матрицей ориентации ЛИППС. Этот сдвиг происходил из-за изменения ориентации ЛИППС, свет дифрагировал преимущественно от поверхностных периодических структур с векторами решётки, параллельными источнику света. В результате было достигнуто плавное движение цвета по поверхности.

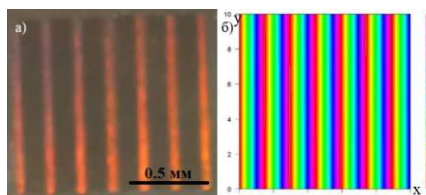


Рис. 1. Фотография маркировки (а) сопоставленная с рассчитанной матрицей (б)

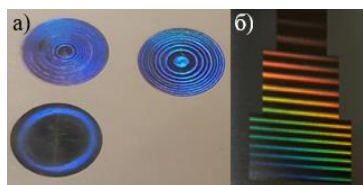


Рис. 2. Фотографии радиальных (а) и линейных (б) структур

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, проект № 21-79-10241.

Список литературы

1. Bonse J., et. al. Laser-induced periodic surface structures – A scientific evergreen // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2016. V. 23. No. 3.
2. Gnilitkyi I., et. al. High-speed manufacturing of highly regular femtosecond laser-induced periodic surface structures: physical origin of regularity // Scientific Reports. 2017. V. 7. No. 1. P. 1-11.
3. Dusser B., et. al. Controlled nanostructures formation by ultra-fast laser pulses for color marking // Optics Express. 2010. V. 18. No. 3. P. 2913-2924.

Е.А. ЧЕРНЫХ¹, С.С. ХАРИНЦЕВ^{1,2}

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет

²Институт прикладных исследований АН Республики Татарстан, Казань

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ СТЕКЛОВАНИЯ ТОНКОЙ ПОЛИМЕРНОЙ ПЛЁНКИ С ПОМОЩЬЮ ТЕРМОПЛАЗМОННОЙ МЕТАПОВЕРХНОСТИ

Мы демонстрируем новый подход оптического детектирования температуры стеклования тонкой полимерной плёнки ПММА (полиметилметакрилата), нагреваемой с помощью термоплазмонной метаповерхности. Метаповерхность представляет собой массив плазмонных наноантенн из нитрида титана TiN квадратной формы, расположенных на кремниевой подложке. Под действием непрерывного лазерного излучения в условиях плазмонного резонанса наноантенны создают локальный фотонагрев, регистрируемый термометрией комбинационного рассеяния света. Создаваемый таким образом нагрев позволяет детектировать локальную температуру стеклования тонкой полимерной плёнки с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света.

Е.А. CHERNYKH¹, S.S. KHARINTSEV^{1,2}

¹Kazan Federal University

²Institute of Applied Research of the Tatarstan Academy of Sciences, Kazan

DETERMINATION OF THE LOCAL GLASS TRANSITION TEMPERATURE OF A THIN POLYMER FILM USING A THERMOPLASMON METASURFACE

We demonstrate a new approach to optical detection of the glass transition temperature of a thin polymer PMMA (polymethyl methacrylate) film heated using a thermoplasmonic metasurface. The metasurface is an array of square-shaped titanium nitride TiN plasmonic nanoantennas located on a silicon substrate. Under the action of continuous laser radiation under conditions of plasmon resonance, the nanoantennas create local photoheating, which is recorded by Raman scattering thermometry. The heating created in this way makes it possible to detect the local glass transition temperature of the thin polymer film using Raman spectroscopy.

Температура стеклования полимерной плёнки полиметилметакрилата (ПММА) может быть определена с помощью комбинационного рассеяния света по поведению интенсивности колебательной моды полимера. При

этом нагрев плазмонной наноструктуры регистрируется с помощью термометрии комбинационного рассеяния света кремниевой подложки по отношению интенсивностей стокса/антистокса и сдвигу линии кремния 520 см^{-1} .

На рис. 1а показан спектр комбинационного рассеяния плёнки ПММА. Интенсивности стоксовых линий соответствуют следующим модам колебаний: 601 см^{-1} ($\text{C}=\text{O}-\text{C}$), 810 см^{-1} ($\text{C}-\text{O}-\text{CH}_3$), 1460 см^{-1} ($\text{O}-\text{CH}_3$). Рис. 1б демонстрирует сечение интенсивности колебательной моды 810 см^{-1} для полимерной плёнки, нагреваемой наноструктурой из нитрида титана. Интенсивность стоксовой линии пропорциональна интенсивности накачки. По достижении температуры стеклования энергия света переходит в тепловую и идет на размораживание сегментарной подвижности основной цепи полимера. Это приводит к замедлению роста интенсивности, что определяется путём вычисления кумулятивной функции Пирсона.

Используя плазмонную метаповерхность были получены следующие значения локальной температуры стеклования для различных колебательных мод (рис. 1в): $110 \pm 6\text{ }^\circ\text{C}$ (601 см^{-1}), $103 \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$ (810 см^{-1}) и $120 \pm 7\text{ }^\circ\text{C}$ (1460 см^{-1}). Точность рассчитывалась путём усреднения по ансамблю наноструктур на метаповерхности. Значения температур стеклования хорошо согласуются со значением, полученным с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии ($T_g = 109\text{ }^\circ\text{C}$).

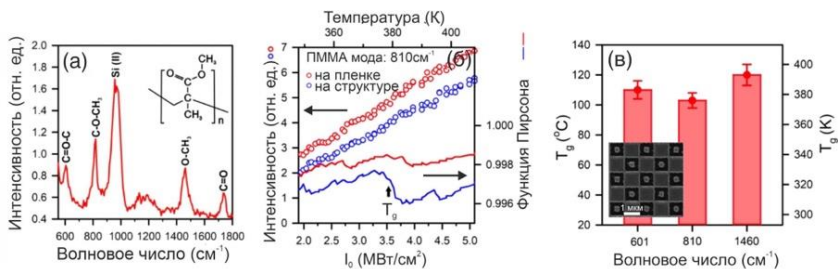


Рис. 1. Спектр комбинационного рассеяния света ПММА (а); график температурной зависимости интенсивности стоксовой линии 810 см^{-1} ПММА (б); значения T_g тонкой плёнки ПММА для различных колебательных мод (в)

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта РФФИ (№ 20-32-90090).

С.В. САПАРИНА¹, С.С. ХАРИНЦЕВ^{1,2}

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет

²Институт прикладных исследований АН Республики Татарстан, Казань

НАНОСПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ АМОРФНЫХ УГЛЕРОДНЫХ ПЛЁНОК МЕТОДОМ ГИГАНТСКОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА С ЭЛЕКТРОНАГРЕВОМ ОБРАЗЦА

В настоящей работе для разрешения сильно перекрытых полос спектра комбинационного рассеяния аморфной углеродной плёнки мы воспользовались спектроскопией гигантского комбинационного рассеяния с электронагревом образца. Было достигнуто улучшенное спектральное разрешение полос на 1260 и 1400 см⁻¹, которые относятся к функциональным (COOH/C-OH) группам.

S.V. SAPARINA¹, S.S. KHARINTSEV^{1,2}

¹Kazan Federal University

²Institute of Applied Research of the Tatarstan Academy of Sciences, Kazan

NANOSPECTROSCOPIC ANALYSIS OF AMORPHOUS CARBON FILMS VIA ELECTRO-ASSISTED TIP-ENHANCED RAMAN SCATTERING METHOD

In this work, to resolve the strongly overlapped bands of the Raman spectrum of an amorphous carbon film, we used electro-assisted tip-enhanced Raman spectroscopy. An improved spectral resolution was achieved for the bands at 1260 and 1400 cm⁻¹, which belong to the functional (COOH/C-OH) groups.

Аморфный углерод представляет собой крайне неупорядоченный материал, содержащий огромное количество структурных дефектов и примесей (порядка 10¹⁷ - 10²⁰ см⁻³). Спектр комбинационного рассеяния аморфных углеродных плёнок имеет достаточно сложную структуру и состоит из большого количества перекрывающихся полос. В работе для разрешения сильно перекрытых полос спектра комбинационного рассеяния углеродной плёнки мы воспользовались спектроскопией гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) с электронагревом образца (рис. 1).

Известно, что интенсивность ГКР в случае когерентного рассеяния пропорциональна 8-й степени расстояния зонд-образец, тогда как некогерентный случай удовлетворяет 10-й степенной зависимости [1].

Электронагрев аморфных углеродных покрытий позволяет активировать в горячих точках зависящие от температуры химические реакции, например, расширение sp^2 -графитоподобных кристаллов. Под воздействием падающего света с глубиной субволновой длины становится возможным получить когерентный отклик ГКР, и, таким образом, широкие D полосы первого порядка могут быть спектрально разрешены из-за увеличения длины фоновой когерентности. На рис. 2 показаны спектры ГКР аморфного углеродного покрытия толщиной 31 нм при различных значениях приложенного напряжения. Локальный электронагрев приводит к увеличению интенсивности $D^\pm$ полос, что соглася с появлением безводных гидроксильных групп. С другой стороны, наблюдаемые $D^\pm$ полосы сужаются за счёт расширения бездефектных sp^2 областей, следовательно, можно получить когерентный отклик ГКР. Поскольку при электронагреве некоторые из функционализированных дефектных участков становятся обеднёнными водой, то их относительные интенсивности увеличиваются, что приводит к улучшенному спектральному разрешению полос.

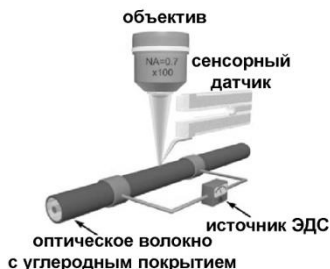


Рис. 1. Схема эксперимента

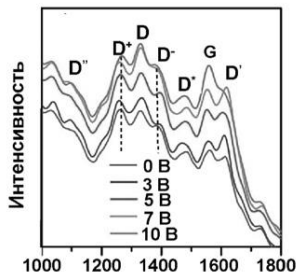


Рис. 2. ГКР-спектры аморфного углеродного покрытия толщиной 31 нм при разных значениях приложенного напряжения

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в научном проекте № 20-32-90086. Работа Х.С.С. (математическая обработка экспериментальных данных) выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (№ 19-12-00066).

Список литературы

1. Cançado L.G., Jorio A.V., et al. // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 103 (18). P. 186101.

Е.Д. МИНАЕВА^{1,2}, А.А. АНТОШИН^{2,3}, Н.В. МИНАЕВ²

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²Институт фотонных технологий

ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Троицк

³Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО ПРЯМОГО ПЕРЕНОСА АГРЕГАТОВ ИЗ ЖИВЫХ КЛЕТОЧНЫХ КУЛЬТУР – КЛЕТОЧНЫХ СФЕРОИДОВ

В работе представлены результаты экспериментов по лазерноиндуцированному прямому переносу гелевых микрокапель, содержащих живые клеточные агрегаты – клеточные сфероиды. Для отработки процесса биопечати подобраны параметры лазерного воздействия, включая формы профиля лазерного пучка. Проанализирована выживаемость клеточных сфероидов в результате лазерноиндуцированного прямого переноса. Данный метод позволяет проводить контролируемый процесс печати клеточными сфероидными без их повреждения.

E.D. MINAEVA^{1,2}, A.A. ANTOSHIN^{2,3}, N.V. MINAEV²

¹National Research Nuclear University MPEHI (Moscow Engineering Physics Institute)

²Institute of Photon Technologies of FSRC «Crystallography and Photonics» RAS, Troitsk

³Sechenov First Moscow State Medical University

STUDY OF LASER-INDUCED FORWARD TRANSFER PROCESS OF LIVING CELL CULTURAL AGGREGATES – SPHEROIDS

The paper presents experimental results of laser-induced direct transfer of gel microdroplets containing living cell aggregates – cell spheroids. To fine-tune the bioprinting process, the parameters of the laser interaction were selected, including the shape of the laser beam profile. The survival rate of cell spheroids due to laser-induced forward transfer was analyzed. This method allows controlled bioprinting process of living cell spheroids without damage.

В настоящее время тканевая инженерия является востребованным подходом к восстановлению повреждённых участков тканей и органов. Трёхмерная биопечать является одним из инструментов формирования матриц из биосовместимых и биорезорбируемых материалов для последующего имплантации в повреждённые участки тканей.

Лазерноиндуцированный прямой перенос (в англоязычной литературе Laser Induced Forward Transfer – LIFT) является бесконтактным видом биопечати. Используя энергию лазерных импульсов подход позволяет проводить биопечать гелевых микрокапель с находящимися внутри них клеточными агрегатами с высоким процентом выживаемости [1].

Целью работы была разработка и сборка лабораторного стенда, разработка методики и отработка алгоритма по лазерноиндуцированному прямому переносу клеточных сфероидов.

В основу установки для реализации процесса лазерного переноса легла ранее собранная система [2]. Основное отличие связано с перераспределением энергии лазерного излучения в профиле пучка для повышения выживаемости переносимых клеточных сфероидов. Источником излучения служит импульсный твердотельный с длиной волны 1053 нм, длительностью импульса 7 нс. Для увеличения диаметра пучка лазера (0,7 мм) использовались телескопический объектив с увеличением 2.0х - 8.0х и моторизированный расширитель пучка с увеличением 1.0х - 3.0х, что позволяло менять диаметр пучка в диапазоне от 4 до 6 мм. Для изменения профиля пучка используется формирователь пятна «Pi-Shaper» [3], позволяющий изменять гауссово распределение на распределение «кольцо», «кольцо с точкой в центре», «flat-top» и др. Как показали результаты исследований, использование такого оптического элемента позволяет воздействовать на сфероид в щадящем режиме.

Проведена разработка и сборка лабораторного стенда, разработка методики и отработка алгоритма лазерного воздействия одиночными импульсами на клеточные сфероиды 200 - 300 мкм в диаметре. Энергии одиночных лазерных импульсов составляли 100 - 240 мкДж. Напечатаны простейшие геометрические объекты и проанализирована их выживаемость.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части развития лазерных аддитивных технологий.

Список литературы

1. Koch L. et al. // Tissue Eng. Part C. Methods. 2010. V. 16 (5). P. 847-854.
2. Минаев Н.В., Юсупов В.И. и др. // Приборы и техника эксперимента. 2019. Т. 1. С. 153-155.
3. Laskin A. // Proceedings of SPIE. 2009. V. 7430. P. 743003.

В.Г. КОНЦЕВАЯ, К.Г. КУЛИКОВ¹, О.А. ЕГОРОВА²

Псковский государственный университет

¹*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

²*Петербургский государственный университет путей сообщения*

Императора Александра I

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОРАССЕЯНИЯ НА ГРУППЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ И СТРУКТУРЫ

В работе построена математическая модель для расчёта спектральных характеристик биологических частиц с учётом их структуры и эффектов многократного светорассеяния, имитирующих форменные элементы крови для случая *in vitro*.

V. G. KONTSEVAYA, K.G. KULIKOV¹, O.A. EGOROVA²

Pskov State University, Pskov

¹*Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University*

²*Emperor Alexander I Saint-Petersburg State Transport University*

DETERMINATION OF THE SPECTAL CHARACTERISTICS OF LIGHT SCATTERING ON A GROUP OF BIOLOGICAL PARTICLES OF VARIOUS SHAPES AND STRUCTURES

The article developed a mathematical model for calculating the spectral characteristics of biological particles, taking into account their structure and the effects of multiple light scattering, simulating uniform blood elements for case *in vitro*.

Анализ крови является одним из главных инструментов современной медицинской диагностики. Красные клетки крови – эритроциты – доставляют к органам и тканям кислород и уносят от них углекислый газ, поддерживая жизнедеятельность организма в целом. Важную роль в этом процессе играет состояние самих клеток – их размеры, формы, деформируемость. Таким образом, знание оптических характеристик биологических структур, в частности форменных элементов крови, является одним из ключевых моментов при разработке математических моделей, адекватно описывающих распространение света в биоткани, что, в свою очередь, принципиально важно для развития новых оптических методов, используемых в различных областях биологии и медицины [1, 2].

Работа посвящена разработке математической модели взаимодействия лазерного излучения с биологическими объектами различной степени сложности и организации (форменные элементы крови), а также проведён анализ на предмет возможной агрегации моделируемых частиц. Отметим, что создание подобных моделей играет всё большую роль в развитии современных наук о человеке.

К наиболее существенным результатам относятся следующие: построена новая модель для прогнозирования спектральных характеристик совокупности сферических частиц со сложной структурой, самосогласованно учитывающая многократное рассеяние для случая *in vitro*. На базе построенной математической модели разработано эффективное программное обеспечение, которое позволило провести численный эксперимент в широких диапазонах параметров задачи. Модель позволяет определять не только спектральные распределения оптических параметров биологической среды, но и динамику их изменения, происходящих под действием различных факторов и приводящих к изменению функционально-морфологического состояния биоткани, например, агрегирование форменных элементов крови. Также модель достаточно чувствительна к изменению геометрических характеристик ядра, плазматической мембраны, что позволяет более детально исследовать физиологические процессы, протекающие в организме, так как размеры ядра могут изменяться, часто параллельно с изменениями метаболизма, или это может быть связано с повреждением клетки или её физиологическими функциями. Модель позволяет выявить оптимальный интервал для экспериментальных исследований спектральных характеристик суспензий форменных элементов крови. Таким образом, разработанный программный комплекс эффективным и универсальным инструментом исследования для специалистов в области биомедицинской оптики.

Список литературы

1. Тучин В.В. Оптика биологических тканей. Методы рассеяния света в медицинской диагностике. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012.
2. Тучин В.В. Лазеры и волоконная оптика в биомедицинских исследованиях. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010.

О.М. ВОХНИК¹, П.В. КОРОЛЕНКО^{1,2}

¹*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

²*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ В АНАЛИТИЧЕСКОМ РЕЗОНАТОРЕ ЛАЗЕРНОГО СПЕКТРОМЕТРА

Рассмотрена практически значимая группа вопросов, относящаяся к определению факторов, влияющих на качество регистрации спектров в лазерном спектрометре с внешним аналитическим резонатором. Особое внимание уделено анализу эффектов насыщения поглощения в однородно и неоднородно уширенных спектральных линиях. Показано влияние этих эффектов на регистрируемую форму спектральных линий в резонаторах различной добротности.

O.M. VOKHNIK¹, P.V. KOROLENKO^{1,2}

¹*Lomonosov Moscow State University*

²*Lebedev Physics Institute of the RAS, Moscow*

SPECIFIC FEATURES OF THE RADIATION INTERACTION WITH MATTER IN AN ANALYTICAL RESONATOR OF A LASER SPECTROMETER

The physical factors affecting the quality of recording spectra in a laser spectrometer with an external analytical cavity are considered. Special attention is paid to the analysis of absorption saturation effects in homogeneously and inhomogeneously broadened spectral lines. The influence of these effects on the recorded shape of spectral lines in resonators of various Q-factors is shown.

Существует целый ряд публикаций, в которых изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований работы лазерных спектрометров с внешним аналитическим резонатором (например, [1, 2]). Однако ряд практически значимых вопросов не получил в литературе необходимого освещения. С точки зрения влияния на чувствительность и точность спектральных измерений нуждается в уточнении оценка роли насыщения поглощения спектральных линий и характера их уширения. Изучение указанных физических фактов определило цель данной работы, посвящённой численному моделированию формы линии поглощения, регистрируемой после прохождения излучением аналитического резонатора спектрометра. В расчётах варьировались коэффициент

поглощения α , форм-фактор линии поглощения и добротность резонатора. Полезный сигнал Y определялся как разность амплитуд A резонансных пиков в центре линии поглощения и вдали от него.

При невысокой добротности аналитического резонатора зависимость сигнала Y от α линейна, но величина Y при малых ($\sim 10^{-4}$) коэффициентах α невелика и плохо измерима. Для увеличения Y необходимо повышать добротность аналитического резонатора, однако при этом начинает играть все более заметную роль эффект насыщения поглощения: зависимость сигнала Y от α становится нелинейной, расчётный контур $A(\omega)$ линии поглощения уширяется и искажается.

На рис. 1 представлены результаты расчёта контуров $A(\omega)$ линии поглощения на выходе высокодобротного резонатора при исходном гауссовом (а) и лоренцевом (б) форм-факторах для случаев, когда насыщение не проявляется (кривые 1 на обоих рисунках) и явно выражено (кривые 2 и 3 на рис. 1а и кривая 2 на рис. 1б). Для гауссова форм-фактора при переходе в область насыщения характерно сначала уширение линии с сохранением её формы (кривая 2), а затем уширение сопровождается значительным искажением формы (кривая 3). В случае лоренцева форм-фактора линия сохраняет свою форму, но её ширина увеличивается.

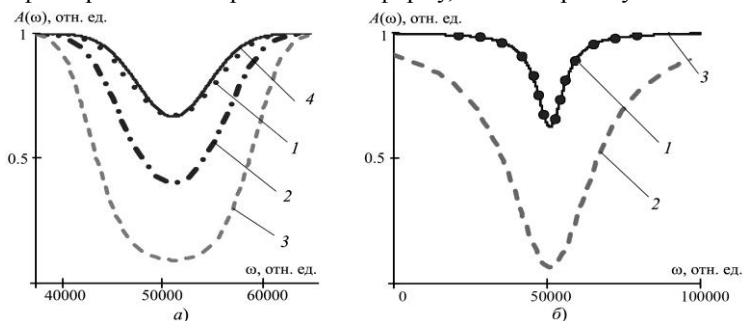


Рис. 1. Расчётная форма линии поглощения при гауссовой форме линии (а) для $\alpha = 5 \cdot 10^{-4}$ (1), $1.5 \cdot 10^{-3}$ (2), $1 \cdot 10^{-2}$ (3) и лоренцевой (б) для $\alpha = 5 \cdot 10^{-4}$ (1), $1.5 \cdot 10^{-2}$ (2); сплошные линии 4 (а) и 3 (б) – исходные форм-факторы

Работа поддержана Российским научным фондом (проект 1919-12-00310).

Список литературы

1. Korolenko P.V., Nikolaev I.V., Ochkin V.N., et al. // Quantum Electronics. 2014. V. 44. No. 4. P. 353.
2. Lagunov V.V., Nikolaev I.V., Ochkin V.N. // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 2021. V. 246. P. 119060.

М.Л. ГАЛКИН^{1,2}, Е.А. ЛОНШАКОВ¹, К.Н. МИНЬКОВ¹,
А.Н. ДАНИЛИН^{1,3}, И.А. БИЛЕНКО^{1,3}

¹*Российский квантовый центр, Сколково*

²*Сколковский институт науки и технологий*

³*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИОДНОГО ЛАЗЕРА, ЗАТЯНУТОГО НА ВНЕШНИЙ РЕЗОНАТОР С МОДАМИ ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ

Приведены результаты экспериментов по измерению пространственного и частотного спектра мод лазерного диода, затянутого на различные моды кристаллического микрорезонатора с высокой добротностью с модами шепчущей галереи в зависимости от трёх характеристик системы, а именно: частоты отстройки, коэффициента связи с резонатором, а также фазы обратной волны.

M.L. GALKIN^{1,2}, E.A. LONSHAKOV¹, K.N. MINKOV¹,
A.N. DANILIN^{1,3}, I.A. BILENKO^{1,3}

¹*Russian Quantum Center, Skolkovo*

²*Skolkovo Institute of Science and Technology*

³*Lomonosov Moscow State University*

STUDY OF THE SPECTRAL CHARACTERISTICS OF A DIODE LASER SELF-INJECTION LOCKED TO AN EXTERNAL RESONATOR WITH WHISPERING GALLERY MODES

We present the results of experiments on measuring the spatial and frequency spectrum of a laser diode modes, that is self-injection locked to different modes of a crystal high-Q whispering gallery modes microresonator as a function of three system characteristics, namely: the detuning frequency, the coupling coefficient with the resonator, and the phase of the backward wave.

Высокостабильные лазеры с малой шириной линии и высокой стабильностью являются необходимыми элементами спектроскопии высокого разрешения, лазерных локаторов (ЛИДАРов), оптических стандартов частоты и многих других измерительных систем. В настоящее время источники с шириной линий лазерной генерации < 200 Гц являются коммерчески доступными, серийно выпускаемыми изделиями [1], в то время, как для лучших экспериментальных образцов эта величина может составлять менее 40 мГц [2].

Одним из способов получения такого источника является стабилизация выходного излучения лазерного диода за счёт эффекта затягивания на моды микрорезонатора с высокой добротностью. При использовании внешнего микрорезонатора с добротностью более 10^6 удаётся добиться стабильной генерации сигнала с шириной линии < 100 Гц, что было продемонстрировано нами ранее [3].

Однако, коэффициент стабилизации при затягивании является функцией многих переменных [4], в частности, добротности микрорезонатора, коэффициента связи с микрорезонатором, частоты отстройки, и фазы обратной волны. Из всех перечисленных параметров только варьирование добротности микрорезонатора представляется сложно реализуемой задачей, хотя в этом направлении ведутся работы [5].

Используя автоматизированный измерительный стенд мы получили массив параметров лазерного диода компании Semipex, включающий его пространственный и частотный спектр как функции тока (рис. 1), связи и фазы обратной волны. Мы оценили стабильность и повторяемость режимов генерации, полученные результаты (рис. 2) согласуются с теорией [3].

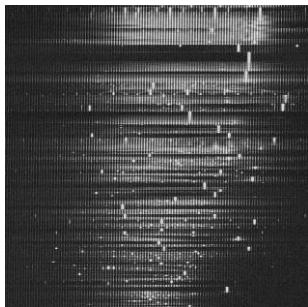


Рис. 1. Пример массива данных зависимости спектральной мощности лазера от тока накачки (длина волны по OX, ток накачки по OY)

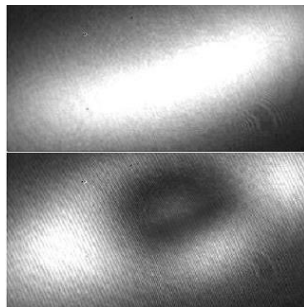


Рис. 2. Фотографии поперечного распределения лазерного пучка при затягивании на различные поперечные моды

Список литературы

1. Liang W., Ilchenko V.S., Savchenkov A.A., et al. // Opt. Lett. 2010. V. 35. P. 2822-2824.
2. Kessler T., Hagemann C., Grebing C., Legero T., Sterr U., Riehle F., Ye J. // Nature Photonics 2012. V. 6(10). P. 687-692.
3. Galiev R.R., Pavlov N.G., Gorodetsky M.L., et al. // Opt. Express. 2018. V. 26. P. 30509-30522.
4. Galiev R.R., et al. // Physical Review Applied. 2020. V. 14. No. 1 P. 014036.
5. Dorche A.E., et al. // OSA Technical Digest. 2021. P. FTu2L.3.

М.В. ГОРБУНКОВ, В.С. ЕРМАКОВ¹, Ю.Я. МАСЛОВА,
Ю.В. ШАБАЛИН

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

ДИНАМИКА ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ЛАЗЕРА, УПРАВЛЯЕМОГО ДВУМЯ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИМИ ОБРАТНЫМИ СВЯЗЯМИ, В РЕЖИМЕ ГАРМОНИЧЕСКОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ МОД

Для режима гармонической синхронизации мод, реализуемого за счёт отрицательной электрооптической обратной связи, путём численного моделирования динамики лазера, выявлены преимущества использования дополнительной цепи обратной связи.

M.V. GORBUNKOV, V.S. ERMAKOV¹, Yu.Ya. MASLOVA,
Yu.V. SHABALIN

Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

¹Bauman Moscow State Technical University

DYNAMICS OF A SOLID-STATE LASER CONTROLLED BY DUAL ELECTRO-OPTICAL FEEDBACK IN THE HARMONIC MODE LOCKING REGIME

For the regime of harmonic mode locking which is organized using negative electro-optical feedback control, the advantages of the second feedback loop are investigated by numerical simulation of the laser dynamics.

В настоящее время широко востребованы последовательности ультракоротких лазерных импульсов с высокой частотой следования (ГГц). Возможные области применения включают лазерную обработку материалов [1], телекоммуникации [2] и т.д. На сегодняшний день последовательность импульсов с высокой частотой следования реализуется в основном за счёт синхронизации мод в коротких резонаторах с помощью керровской линзы, насыщающегося поглотителя или электрооптического модулятора, помещённого в высокодобротный резонатор [3]. Надёжный и стабильный диодно-накачиваемый твердотельный лазер, охваченный цепью отрицательной обратной связи, работающий в режиме гармонической синхронизации мод, является

хорошей альтернативой другим системам. Он может работать в режиме импульсной и непрерывной накачки. При гармонической синхронизации мод в резонаторе распространяются несколько равноудалённых импульсов. В нашем случае гармоническая синхронизация мод осуществляется за счёт задержки отрицательной электрооптической обратной связи и выбора электрических параметров схемы управления [4]. Добавление второй обратной связи (рис. 1) позволяет более гибко управлять параметрами выходного излучения: сокращать длительность импульсов, увеличивать предельное усиление, повысить амплитудную стабильность, реализовать существенно более богатую нелинейную динамику. Преимущества подхода подтверждены путём различных способов численного моделирования динамики лазера (в том числе метода точечных отображений).

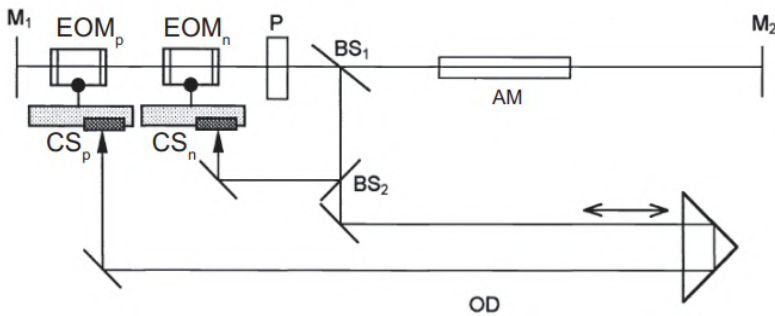


Рис. 1. Схема твердотельного лазера, управляемого двумя электрооптическими обратными связями: M_1 и M_2 – зеркала резонатора; АМ – активная среда; BS_1 и BS_2 – делительные пластинки; OD – оптическая линия задержки; CS_p и CS_n – оптоэлектронные схемы управления модуляторами; EOM_p , EOM_n – электрооптические модуляторы; P – поляризатор

Список литературы

1. Kerse C., Kalaycioglu H., Elahi P., Akcaalan Ö., Ilday F.Ö. 3.5-GHz intra-burst repetition rate ultrafast Yb-doped fiber laser // Opt. Commun. 2016. V. 366. P. 404-409.
2. Soibel A., et al. Mid-infrared interband cascade lasers for freespace laser communication // Proc. SPIE. 2009. V. 7199. P. 71990E.
3. Li C., Winkelmann L., Hartl I. 6 GHz repetition rate photocathode laser for multi-bunch operation of a relativistic electron gun // in Proc. Conf. Lasers Electro-Optics, 2018. P. 1-2.
4. Gorbunkov M.V., Maslova Y.Y., Shabalin Y.V., Tunkin V.G. Analysis of self-starting harmonic mode-locking in an electro-optic-feedback laser // IEEE Journal of Quantum Electronics. 2021. V. 57. No. 6. P. 1-8.

А.А. ИБРАГИМОВ, А.С. ШОРОХОВ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

МОДУЛЯЦИЯ СВЕТА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ МЕТАПОВЕРХНОСТЯМИ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИНЖЕКЦИИ СВОБОДНЫХ НОСИТЕЛЕЙ

Метаповерхности из диэлектрических наноструктур – субдифракционные массивы наноантенн из прозрачных материалов – могут усиливать взаимодействие света с веществом, что находит применение во многих прикладных задачах, включая металинзы, голограммы и оптические фильтры. Однако такие элементы почти всегда являются пассивными в том плане, что их оптические свойства определены на этапе производства и в дальнейшем никак не могут изменяться. Для решения данной проблемы может быть использован механизм инжекции свободных носителей в материал наноантенн, либо с помощью оптических импульсов [1], либо с помощью приложения внешнего электрического поля [2]. Именно второй подход будет рассматриваться в данной исследовательской работе. Метаповерхности с возможностью модуляции их оптических свойств за счёт внешних сил могут стать эффективным инструментом в области прикладной фотоники.

A.A. IBRAGIMOV, A.S. SHOROKHOV

Lomonosov Moscow State University

LIGHT MODULATION BY SEMICONDUCTOR METASURFACES VIA ELECTRIC INJECTION OF FREE CARRIERS

Metasurfaces of dielectric nanostructures – subdiffractive arrays of nanoantennas made of transparent materials – can enhance the interaction of light with matter, which has applications in many applications, including metasurfaces, holograms and optical filters. However, these devices are almost always passive in the sense that their optical properties are fixed at the production stage and cannot be modified afterwards. The free carrier injection mechanism into the nanoantenna material, either by using optical emission pulses [1] or by applying an external electric field [2], can be used to solve this problem. It is the second approach that will be considered in this research work. Metasurfaces with the possibility of modulation of their optical properties by external forces can become an effective technique in applied photonics.

В данной работе ставится задача численного и экспериментального исследования спектра отражённой электромагнитной волны от субволнового массива цилиндрических отверстий, протравленных в гетероструктуре типа р-п диода, изготовленной на основе GaAs (арсенида галлия) с металлическими контактами для контролируемой инжекции свободных носителей в образец. Данная гетероструктура обладает особенностью в спектре отражения в интересующей нас спектральной области вблизи $\lambda = 1000$ нм. Эта особенность проявляется в виде провала в спектре отражения и связана с возбуждением Фано-резонанса. Спектральный диапазон обусловлен прозрачностью GaAs для минимизации оптических потерь в структуре. При этом также остается возможность наблюдать значительные изменения оптических свойств материала наноантенн при инжекции свободных носителей внутрь структуры. В эксперименте планируется провести анализ зависимости резонанса (его спектрального положения и добротности) от приложенного напряжения к структуре, и как следствие, от концентрации свободных носителей в ней.

Выбор протравленных наноцилиндров в качестве составных элементов данных структур обусловлен сравнительной простотой их изготовления, а использование GaAs как основного материала гетероструктуры позволит получить значительные изменения оптических свойств при модуляции. Также для достижения большей добротности резонанса в спектре отражения в дальнейшем планируется изменение используемой геометрии на более сложную [3], что также позволит управлять не только спектром отражения, но и распределением энергии отражённой электромагнитной волны в пространстве.

Список литературы

1. Ding L., Morits D., et al. All-optical modulation in chains of silicon nanoantennas // ACS Photonics. 2020. V. 7. No. 4. P. 1001-1008.
2. Zhang1 W., Yao J. A fully reconfigurable waveguide Bragg grating for programmable photonic signal processing // Nature Communications. 2018. V. 9. P. 1396.
3. Lawrence M., Barton III D.R., et al. High quality factor phase gradient metasurfaces // Nature Nanotechnology. 2020. V. 15. P. 956-961.

В.Н. СМІРНОВ, І.А. СЕМЕРИКОВ, І.В. ЗАЛИВАКО,
А.С. БОРИСЕНКО, М.Д. АКСЕНОВ, П.Л. СИДОРОВ,
Н.В. СЕМЕНИН, І.А. ЖУРАВЛЕВ, К.Ю. ХАБАРОВА,
Н.Н. КОЛАЧЕВСКИЙ

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

ОХЛАЖДЕНИЕ ИОНА ИТТЕРБИЯ 171 ДО ОСНОВНОГО КОЛЕБАТЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КВАДРУПОЛЬНОГО ПЕРЕХОДА

Произведён расчёт охлаждения иона иттербия-171 до основного колебательного состояния с использованием сильно-запрещённого перехода. Исследованы паразитные нагревы вследствие перекачки иона в начальное состояние. Финальная последовательность импульсов за время порядка 5 мс охлаждает ион до среднего колебательного числа $n = 0.219$ с населённостью основного колебательного состояния 81.4 %.

V.N. SMIRNOV, I.A. SEMERIKOV, I.V. ZALIVAKO,
A.S. BORISENKO, M.D. AKSENOV, P.L. SIDOROV, N.V. SEMENIN,
I.A. ZHURAVLEV, K.Yu. KHABAROVA, N.N. KOLACHEVSKY

Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

GROUND STATE COOLING OF 171Yb ION VIA QUADRUPOLE TRANSITION

We implement calculations of ground state cooling of 171-Yb ion with usage of a strongly forbidden transition. Parasitic heating due to the transfer of an ion to the initial state after each cooling pulse is investigated. The optimal sequence of cooling pulses is found for the scheme with the excitation of the first and second red vibrational sidebands. For a time of about 5 ms and 200 cooling pulses, we theoretically achieve an average vibrational number $n = 0.219$ and a population of the ground vibrational state of 81.4 %.

Сегодня квантовые вычисления являются очень перспективным и популярным направлением. Одной из важных задач при создании квантового вычислителя с использованием ионов является их охлаждение до основного колебательного состояния. Это необходимо для реализации и увеличения достоверности квантовых операций.

Для охлаждения мы предлагаем использовать узкий квадрупольный переход между S и D термами на длине волны 435 нм. С технической

точки зрения, переход удобен тем, что оптические элементы подвержены меньшей деградации, в сравнении с популярным $S \rightarrow P$ переходом на длине волны 369 нм.

В ловушке Пауля ион совершает движение на секулярной частоте $\omega = 480$ МГц. При использовании лазерного излучения отстройкой на частоту ω от перехода в красную область, возбуждение электрона происходит с потерей фонона, что приводит к охлаждению.

Частота осцилляций Раби для некоторых колебательных уровней принимает нулевое значение (рис. 1) поэтому, на них возникает накапливание населённости [1]. Чтобы этого избежать попеременно используются импульсы с отстройкой на одну или две секулярные частоты [2, 3].

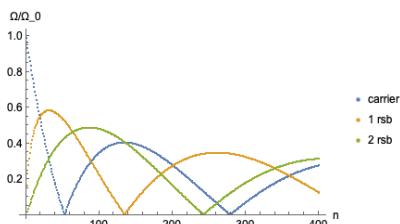


Рис. 1. Относительная частота Раби в зависимости от уровня n

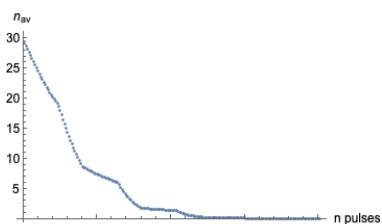


Рис. 2. Зависимость среднего колебательного числа от количества охлаждающих импульсов

Произведена Монте-Карло симуляция процессов перекачки системы в начальное состояние после каждого возбуждения, а также найдены возникающие в результате паразитные нагревы. Найдена оптимальная последовательность охлаждающих импульсов. За время порядка 5 мс и 200 импульсов достигается значение среднего колебательного числа $n = 0.219$ и населённость основного колебательного состояния 81.4 % (рис. 2).

Работа поддержана Российским научным фондом (Грант № 19-12-00274).

Список литературы

1. Leibfried D., Blatt R., Monroe C.R., Wineland D.J. Quantum dynamics of single trapped ions // Reviews of Modern Physics, 2003. V. 75. P. 281-324.
2. Che H., Deng K., Xu Z.T., Yuan W.H., Zhang J., Lu Z.H. // Phys. Rev. A. 2017. V. 96, P. 013417.
3. Sidorov P.L., Khabarova K.Y., Zalivako I.V., et al. Optimization of Raman cooling of 25Mg^+ Ion to ground vibrational state in linear paul trap // Bull. Lebedev Phys. Inst. 2019. V. 46. P. 138-142.

И.И. ЛЫКОВ^{1,2}, А.Е. ШИТИКОВ², А.Н. ДАНИЛИН^{2,3},
В.Е. ЛОБАНОВ², И.А. БИЛЕНКО^{2,3}

¹Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет), Долгопрудный

²Российский квантовый центр, Сколково

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ИЗМЕРЕНИЕ СВЕРХМАЛЫХ СКОРОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРА В РЕЖИМЕ ЗАТЯГИВАНИЯ

В работе рассматривается применение лазера, затянутого высокодобротным микрорезонатором, для измерения сверхмалых скоростей. С помощью лазера с субкилогерцовой шириной линии проведены измерения скоростей до 16 нм/с.

I.I. LYKOV^{1,2}, A.E. SHITIKOV², A.N. DANILIN^{2,3},
V.E. LOBANOV², I.A. BILENKO^{2,3}

¹Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

²Russian Quantum Center, Skolkovo

³Lomonosov Moscow State University

MEASUREMENTS OF ULTRA-LOW SPEED USING SELF-INJECTION LOCKED LASER

The application of a laser diode locked to a high-Q microresonator for measurements of ultra-low velocity was considered. Using sub-kHz laser we performed measurements of velocity as low as 16 nm/s.

Диодные лазеры являются широкодоступными эффективными источниками лазерного излучения, однако для измерения скоростей порядка нм/с применение этих лазеров ограничено из-за ширины линии порядка 1 МГц [1, 2]. В данной работе предлагается использовать лазер с узкой шириной линии (менее 1 кГц), который может быть получен на основе эффекта затягивания лазерного диода на высокодобротный резонатор с модами шепчущей галереи [3]. Для реализации данного эксперимента была использована оптическая схема, основанная на эффекте Доплера. Принцип измерения скорости заключается в следующем. Пусть изначально волна имела частоту ω , а отражённая от движущегося зеркала волна имеет частоту ω' (рис. 1). На фотодетектор падает сумма волн с частотами ω и ω' . На экране осциллографа наблюдаются биения с частотой $\nu_{\text{доп}}$ [4]:

$$\nu_{\text{dop}} = \frac{\Delta\omega}{2\pi} = \frac{\omega' - \omega}{2\pi} = 2 \frac{v}{c} \frac{\omega}{2\pi} = \frac{v}{\lambda/2}. \quad (1)$$

Для определения этой частоты исследовался спектр поступающего сигнала. Далее по формуле (1) определялась скорость. Стоит отметить, что при большом коэффициенте отражения от поверхности движущегося объекта может образовываться интерферометр Фабри-Перо, движение заднего зеркала которого приводит к такому же сигналу на осциллографе.

Было показано (рис. 2), что лазер с узкой линией обеспечивает заметно лучшую точность определения скорости, показав разрешение скорости вплоть до 16 нм/с, тогда как диодный лазер без затягивания позволил с хорошей точностью определить лишь 160 нм/с. Полученные результаты находятся в согласии с предыдущими научными статьями и открывают новые пути развития ЛИДАРов на основе компактных и дешевых лазеров.

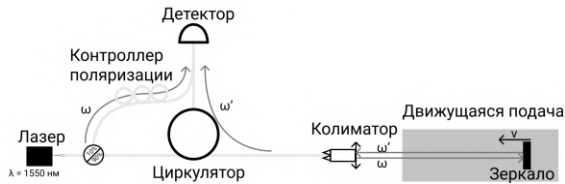


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

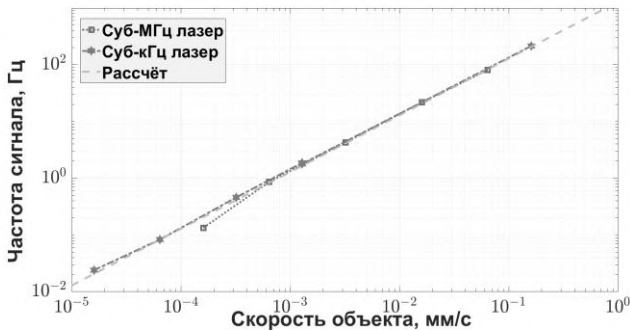


Рис. 2. Зависимость частоты сигнала от скорости движения зеркала

Список литературы

1. Donati S. Developing self-mixing interferometry for instrumentation and measurements // Laser & Photonics Reviews. 2012. V. 6. № 3. P. 393-417.
2. Donati S. Electro-optical instrumentation: sensing and measuring with lasers. Pearson Education, 2004.
3. Kondratiev N.M., et al. Self-injection locking of a laser diode to a high-Q WGM microresonator // Optics Express. 2017. V. 25. № 23. P. 28167-28178.
4. Кологривов В.Н. Эффект Доплера в классической физике. М.: МФТИ, 2012.

В.С. РЫМКЕВИЧ, А.А. БОЛОШКО

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ СТЕКЛА МИКРОПЛАЗМОЙ

В данной работе было исследовано влияние различной длительности импульсов наносекундного диапазона на микрогеометрию формируемых структур на поверхности плавленого кварца лазерно-индуцированной микроплазмой. Показана асимптотическая зависимость размеров структур от длительности импульсов.

V.S. RYMKEVICH, A.A. BOLOSHKO

ITMO University, Saint-Petersburg

NANOSECOND PULSES APPLICATION IN LASER-INDUCED MICROPLASMA GLASS TREATMENT

In this study, we investigated the effect of different nanosecond range pulse durations on the structures microgeometry formed on the fused silica surface by laser-induced microplasma. The obtained results show an asymptotic dependence of the structures size on the pulse duration.

Лазерно-индуцированные методы обработки стёкол могут реализовываться с использованием различных длительностей импульсов начиная от миллисекундного диапазона до фемтосекундного [1, 2]. В работе [3] был численно смоделирован процесс лазерно-индуцированной абляции стекла с помощью плазмы (LIPAA) и показано, что с увеличением длительности импульса от 2 до 6 мс увеличиваются размеры формируемых в пластике каналов в связи закачкой большей энергии в плазменный факел. В данной работе рассматриваемый метод лазерно-индуцированной обработки микроплазмой (LIMP) отличается от LIPAA отсутствием зазора между мишенью и образцом, а также мишенью в виде пластины графита. В LIMP исторически используется длительность импульса в 50 нс [4], однако научного обоснования данному решению в известной литературе не приводится.

Целью работы являлось определение влияния длительности импульса лазерного излучения на результат обработки плавленого кварца лазерно-индуцированной микроплазмой с графитовой мишени. При одинаковой

плотности энергии в 0.89 Дж/см^2 , частоте следования импульсов 40 кГц и скорости линейного перемещения 20 мм/с было записано 8 треков согласно выбранным длительностям импульса в 4, 8, 14, 20, 30, 50, 100 и 200 нс. Поверхность графитовой мишени была исследована на контактном профилометре, а образца – с помощью оптической профилометрии, а полученные профили треков были усреднены. У каждого трека исследовалась его глубина от базовой линии до минимума рельефа и ширина на уровне полу-глубины. Полученные данные для образца и мишени были объединены на графиках (рис. 1).

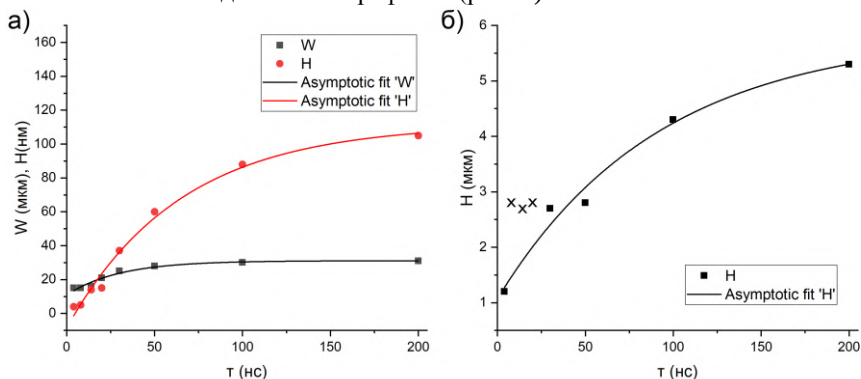


Рис. 1. Зависимость ширины W и глубины H рельефа в образце (а) и глубины рельефа H в мишени от длительности импульса (б), символ “х” – исключённые ошибки измерений

Как и в [3] при увеличении длительности импульса происходило увеличение как глубины, так и ширины получаемых структур. Наличие хорошей асимптотической зависимости на всех графиках ($R^2 > 0.96$) вероятнее всего связано с экранированием лазерного излучения с длительностью импульса больше 100 нс плазменным факелом.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта НИРМА ФТ МФ Университета ИТМО.

Список литературы

1. Schwarz S., Rung S., Esen C., Hellmann R. Ultrashort pulsed laser backside ablation of fused silica // Optics Express. 2021. V. 29. № 15. P. 23477-23486.
2. Sarma U., Joshi S.N. Effect of laser parameters on laser-induced plasma-assisted ablation of glass // Advances in Unconventional Machining and Composites. Springer, 2020. P. 67-76.
3. Sarma U., Joshi S.N. Numerical modelling and simulation of microchannel fabrication on polycarbonate using laser-induced plasma assisted ablation // Optik. 2020. V. 223. P. 165379.
4. Kostyuk G., Sergeev M., Zakoldaev R., Yakovlev E. Fast microstructuring of silica glasses surface by NIR laser radiation // Optics and Lasers in Engineering. 2015. V. 68. P. 16-24.

А.С. ЩЕКИН^{1,2}, А.К. ЖАНАБАЕВА¹, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²ООО НТО «ИРЭ-Полус», Фрязино

МЕТОДИКА РАСЧЁТА КРАЕВОГО УГЛА СМАЧИВАНИЯ ПРИ ПРЯМОМ ЛАЗЕРНОМ СТРУКТУРИРОВАНИИ ПОВЕРХНОСТИ НАНОСЕКУНДНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Представлена методика расчёта краевого угла смачивания поверхности материалов при прямом лазерном структурировании наносекундными лазерными импульсами. Расчёт включает в себя особенности формирования ямок при наносекундной лазерной абляции и поведение краевого угла смачивания с учётом моделей смачивания поверхности Вензеля и Касси-Бакстера. Определены ключевые факторы, влияющие на поведение краевого угла смачивания при лазерной обработке.

A.S. SHCHEKIN^{1,2}, A.K. ZHANABAEVA¹, V.N. PETROVSKIY¹

¹National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

²IRE-Polus Corporation, Fryazino

METHOD OF CALCULATING THE CONTACT ANGLE OF WETTING WITH DIRECT LASER STRUCTURING BY NANOSECOND PULSED

Present the results of calculating the contact angle of material surface wetting during direct laser structuring by nanosecond laser pulses. The calculation includes the features of the formation of pits during nanosecond laser ablation, taking into account the Wenzel and Cassie-Baxter surface wetting models. The key factors influencing the behavior of the contact angle during laser processing are determined.

Прямое лазерное структурирование позволяет менять топографию поверхности, что приводит к изменению поверхностных свойств материала.

Изменение свойств поверхности при помощи лазерного излучения находит широкое применения во многих областях науки и техники. Оно позволяет повышать или понижать адгезию бактерий [1], изготавливать самоочищающиеся поверхности [2] и улучшать трибологические свойства [3] металлов, полимеров и керамик. В последние годы особое распространение получили работы, связанные со структурированием поверхности различных материалов для изменения их смачиваемости.

Структура поверхности играет ключевую роль в смачиваемости материалов. Основными факторами, которые оказывают влияние на смачиваемость, являются топография поверхности и её химический состав [4]. При этом в большинстве работ, посвящённых лазерному структурированию, не указывается значимость какого фактора является доминирующей. Более того поведение краевого угла смачиваемости описывается обобщёнными моделями Вензеля и Касси-Бакстера без учёта особенностей воздействия лазерного излучения

Цель данной работы – построение методики расчёта краевого угла смачивания по моделям Вензеля и Касси-Бакстера с учётом воздействия наносекундных лазерных импульсов на обработку материала, а именно учёт влияния длительности наносекундного импульса на образование жидкой фазы и вытеснение жидкой фазы абляции из области воздействия лазерного импульса.

Для определения влияния характеристик лазерного излучения на формирование текстуры на поверхности материала и поведения краевого угла смачивания на получаемой текстуре рассмотрены две стратегии обработки: столбчатая структура (рис. 1) и ямки (рис. 2).

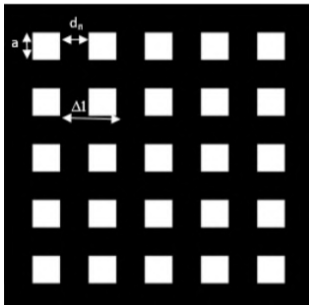


Рис. 1. Схема текстуры «столбики»: черным цветом обозначены области обработки, a – размер столбика, d_n – диаметр пучка, Δl – расстояние между столбиками

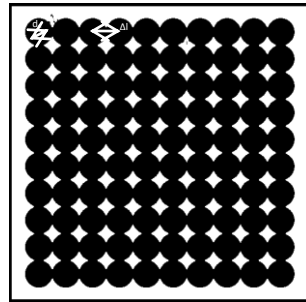


Рис. 2. Схема структуры «ямки»: d_n – диаметр пучка, Δl – расстояние между ямками

Список литературы

1. Liu K, Yao X., Jiang L // Chem. Soc. Rev. 2010. V. 39. P. 3240-3255.
2. Qian H, et. al. // Mater. Sci. Eng. 2017. V. 80. P. 566-577.
3. Xu W C, Shi J Z., et al. // Mater. Res. Innov. 2015. V. 19. P. 207-210.
4. Wang D, Sun Q., et al. // Nature. 2020. V. 582. P. 55-59.

А.Д. ДОЛГОПОЛОВ, В.Р. ГРЕСЬКО, Н.А. ЖЕСТКИЙ,
М.М. СЕРГЕЕВ, Ю.В. МИХАЙЛОВА, Е.В. ГУНИНА

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ЛАЗЕРНАЯ ЗАПИСЬ ПЕРИОДИЧЕСКИХ МИКРО- И НАНОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ ТОНКИХ ПЛЁНОК

В работе приведены результаты экспериментов по созданию периодических электропроводящих микро- и наноструктур на поверхности тонких полупроводниковых плёнок с помощью пикосекундных лазерных импульсов. Определены оптические характеристики полученного микрорельефа и проведён их сравнение с необработанными материалами.

A.D. DOLGOPOLOV, V.R. GRESKO, N.A. ZHESTKY,
M.M. SERGEEV, Yu.V. MIKHAILOVA, E.V. GUNINA

ITMO University, Saint-Petersburg

LASER RECORDING OF PERIODIC MICRO- AND NANOSTRUCTURES ON THE SURFACE OF THIN FILMS

The results of experiments on the creation of periodic electrically conductive micro- and nanostructures on the surface of thin semiconductor films using picosecond laser pulses are presented. The optical characteristics of the obtained microrelief are determined and compared with untreated materials.

Применение наноструктур на полупроводниковых плёнках позволяет повысить эффективность измерения оптических свойств, а также развить новые механизмы взаимодействия оптического излучения с исследуемыми жидкостями, за счёт применения новых функциональных материалов и их производных в качестве подложек [1], усиливающих оптический сигнал. Такие материалы имеют потенциал применения в области контроля качества товаров, мониторинга процессов роста кристаллических структур, изучении биологических процессов.

Периодические нанорешётки, сформированные на композитных золь-гелевых плёнках, в основном рассматриваются как элементы в фотонике, микроаналитических и фотоэлектрических системах [2]. В фотонике субволновые решётки, содержащие наночастицы (НЧ), активно используются в качестве оптических фильтров. Решётка с периодически распределёнными НЧ может служить сенсором в рамановской

спектроскопии. А плазмонные свойства таких материалов полезны для улучшения фотодетектирования.

Материальная функциональность таких приложений обусловлена сочетанием эффектов полупроводниковой плёнки с плазмонными НЧ и периодическим нанорельефом [3]. Тем самым возможно улучшение оптических свойств в определённом спектральном диапазоне за счёт комплексного действия нескольких оптических эффектов, которые могут найти применение в микроанализе и фотокаталитических приложениях.

Целью работы является экспериментальная обработка и исследование изменений оптических характеристик поверхности ряда материалов, таких как полупроводниковые и халькогенидные плёнки, после формирования микрорельефа на их поверхности под действием пикосекундных импульсов в интерференционной схеме. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. При обработке был использован пикосекундный лазер (355, 532 нм; 27 пс). На рис. 2 представлен нанорельеф поверхности на полупроводниковой AlZnO плёнке, полученной в ходе обработки на нашей схеме.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта НИРМА ФТ МФ Университета ИТМО.

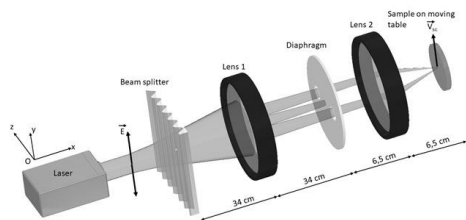


Рис. 1. Экспериментальная схема для интерференционной лазерной обработки

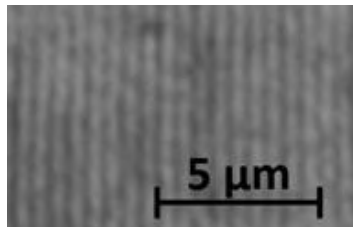


Рис. 2. Периодический рельеф на поверхности плёнки AlZnO

Список литературы

1. Martin L.W., et. al. Multiferroics and magnetoelectrics: thin films and nanostructures // Journal of Physics: Condensed Matter. 2008. V. 20. No. 43. P. 434220.
2. Zinc oxide bulk, thin films and nanostructures: processing, properties, and applications / ed. by C. Jagadish, S.J. Pearton. Elsevier, 2011.
3. Pietsch U., Holy V., Baumbach T. High-resolution X-ray scattering: from thin films to lateral nanostructures. Springer Science & Business Media, 2004.

Е.А. САВЕЛЬЕВ

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН*

ЗАВИСИМОСТЬ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РЕЗОНАНСА ЗАТУХАЮЩЕЙ МОДЫ ОТ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ПОКРЫТИЯ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

Были проведены теоретические расчёты чувствительности резонансов затухающей моды (LMRs), возникающих в спектрах оптического пропускания волоконных световодов, покрытых тонкими плёнками материалов с действительной частью показателя преломления (RI) от 1,7 до 3,4. Обнаружено, что спектральный отклик к изменению RI внешней среды первого TM (поперечный магнитный) LMR больше, чем у первого TE (поперечный электрический) LMR при RI слоя меньше 1,93.

Е.А. SAVELYEV

Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS

DEPENDENCE OF THE LOSSY MODE RESONANCE SENSITIVITY ON THE REFRACTIVE INDEX OF THE OPTICAL FIBER COATING

Theoretical calculations of the sensitivity of the lossy mode resonances (LMRs) appearing in the optical transmission spectra of optical fibers coated with thin films of materials with a real part of the refractive index (RI) from 1.7 to 3.4 were carried out. It was found that the spectral response to a change in the surrounding medium RI of the first TM (transverse magnetic) LMR is greater than that of the first TE (transverse electric) LMR when the RI of the layer is less than 1.93.

Одним из популярнейших приложений волоконно-оптических сенсоров, работающих на основе LMR, является измерение величины RI разнообразных водных растворов, что особенно важно для таких областей, как медицина и биология [1]. Но на сегодняшний день отсутствует сравнительное изучение откликов двух наиболее чувствительных (первых TE и TM) резонансов к изменению RI внешней среды. В экспериментальных исследованиях чувствительность обоих типов LMR чаще всего измеряется для одной и той же толщины покрытия [2, 3]. Главный недостаток таких сравнений – резонансы расположены в разных спектральных диапазонах, при том, что отклик LMR сильно

зависит от длины волны его максимума [4]. Одной из актуальных проблем в этой области является определение и сравнение чувствительностей ТЕ и ТМ LMR как функций RI покрытия в одном и том же спектральном диапазоне. В этой работе рассмотрена длина волны 1,55 мкм, как наиболее значимая для волоконной оптики.

Было установлено, что если показатель преломления тонкой плёнки не зависит от длины волны и примерно равен двум, то одновременно наблюдается максимум чувствительности первого ТМ-резонанса (5057 нм на единицу показателя преломления (ЕПП)) и равенство спектральных откликов ТЕ и ТМ LMR к изменению RI внешней среды (рис. 1а). Однако если материал покрытия обладает хроматической дисперсией ($n = n_0 + D_{ch} \cdot (\lambda - 1,55)$), где n_0 это показатель преломления слоя на длине волны 1,55 мкм, D_{ch} – постоянная величина меньше нуля), то с ростом абсолютного значения D_{ch} чувствительность обоих типов резонансов уменьшается (рис. 1б). Этот эффект более существенен для ТЕ LMR. Следовательно, чем больше $|D_{ch}|$, тем больше значение показателя преломления плёнки, при котором спектральный отклик ТЕ-резонанса становится больше, чем ТМ (рис. 1в).

Работа выполнена по Государственному заданию Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН и частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 20-07-00326.

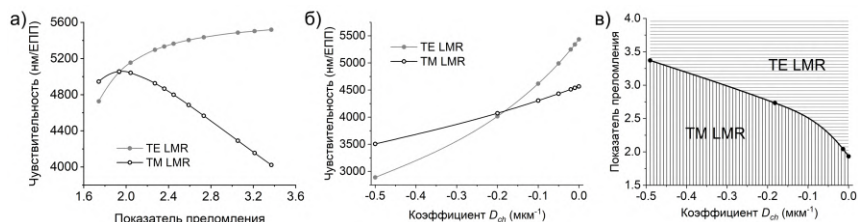


Рис. 1. Зависимость чувствительностей первых ТЕ и ТМ-резонансов от RI плёнки (а) и хроматической дисперсии при RI = 2,73 (б); кривая равенства отклика ТЕ и ТМ LMR к показателю преломления внешней среды (в)

Список литературы

1. Usha S.P., Gupta B.D. // Biosens. Bioelectron. 2018. V. 101. P. 135-145.
2. Zhu S., Pang F., Huang S., Zou F., Dong Y., Wang T. // Opt. Express. 2015. V. 23. P. 13880-13888.
3. Zubiate P., Zamarreño C.R., Villar I.D., Matias I.R. // J. Lightwave Technol. 2015. V. 33. P. 2412-2418.
4. Golant E.I., Pashkovskii A.B., Golant K.M. // J. Commun. Technol. Electron. 2020. V. 65. P. 1457-1459.

И.К. ГОРЕЛОВ¹, А.А. МКРТЧЯН², Ю.Г. ГЛАДУШ²,
А.Е. ШИТИКОВ¹, В.Е. ЛОБАНОВ¹, И.А. БИЛЕНКО^{1,3}

¹*Российский квантовый центр, Сколково*

²*Сколковский институт науки и технологий*

³*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОРЕЗОНАТОРА С НАНЕСЁННЫМИ НА ПОВЕРХНОСТЬ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

Нелинейность углеродных нанотрубок существенно превосходит нелинейности материалов кристаллических микрорезонаторов и волноводов. Нанесение углеродных нанотрубок на поверхность микрорезонатора позволит усилить его нелинейность. В данной работе экспериментально исследованы характеристики высокодобротного микрорезонатора с модами шепчущей галереи с нанесёнными на поверхность однослойными углеродными нанотрубками.

I.K. GORELOV¹, A.A. MKRTCHAN², Yu.G. GLADUSH²,
A.E. SHITIKOV¹, V.E. LOBANOV¹, I.A. BILENKO^{1,3}

¹*Russian Quantum Center. Skolkovo*

²*Skolkovo Institute of Science and Technology*

³*Lomonosov Moscow State University*

INVESTIGATION OF THE CHARACTERISTICS OF A MICRORESONATOR WITH CARBON NANOTUBES

Nonlinearity of carbon nanotubes significantly exceeds nonlinearity of the materials of crystal microresonators and waveguides. Deposition of carbon nanotubes to the surface of the microresonator may enhance its nonlinearity. In this paper, the characteristics of high-quality factor microresonators with whispering gallery modes with single-layer carbon nanotubes deposited on the surface are experimentally investigated.

Высокодобротные оптические диэлектрические резонаторы с модами шепчущей галереи широко используются в настоящее время, как для проведения фундаментальных исследований, так и для создания передовых радиофотонных устройств. Их достоинствами являются малые размеры (от десятков микрон до нескольких миллиметров), добротность, достигающая значений 10^{11} [1], многомодовая структура, высокая концентрация поля в малом объёме и, как следствие, низкие пороги наблюдения нелинейных эффектов. Это позволяет создавать на их основе лазеры с узкой линией, радиофотонные СВЧ-генераторы, узкополосные

оптические фильтры, быстродействующие модуляторы. Одним из перспективных направлений исследований является использование наноматериалов для улучшения характеристик микрорезонаторов [2, 3]. Многообещающим наноматериалом являются однослойные углеродные нанотрубки (ОУНТ), так как их нелинейность существенно превосходит нелинейности материалов микрорезонаторов и волноводов. Коэффициент кубичной нелинейности ОУНТ составляет $10^{-12} - 10^{-13} \text{ м}^2/\text{Вт}$, что на семь порядков выше нелинейности $\text{MgF}_2 - 10^{-20} \text{ м}^2/\text{Вт}$. ОУНТ могут быть перенесены на поверхность, как кристаллических, так и интегральных микрорезонаторов.

Целью данной работы является экспериментальное исследование характеристик микрорезонатора после нанесения ОУНТ, в частности коэффициента нелинейности полученной гибридной структуры. В эксперименте был использован кристаллический микрорезонатор, изготовленный из MgF_2 , с добротностью $Q = 6 \cdot 10^8$, и углеродные нанотрубки, с полупроводниковым межзонным переходом на 1550 нм. Толщина ОУНТ составляла 4 нм, а область покрытия $2 \times 2 \text{ мм}^2$. Нанесение ОУНТ происходило без использования специальных устройств: к резонатору была поднесена плёнка с нанотрубками, прижата к боковой поверхности резонатора, далее она была смочена ацетоном, после чего нанотрубки перешли с нитроцеллюлозного фильтра на резонатор. Непосредственно после вышеописанной процедуры добротность резонатора ухудшилась до $Q = 3 \cdot 10^5$. Далее была осуществлена очистка, не повреждающая поверхности резонатора и плёнки нанотрубок от остатков нитроцеллюлозного фильтра. Промывка резонатора осуществлялась ацетоном, изопропанолом, дистиллированной водой, с последующим обдувом резонатора азотом. После всех этапов очистки была измерена добротность чистого резонатора с нанотрубками: $Q = 10^7$. Далее нанотрубки были удалены с боковой поверхности резонатора безворсовыми салфетками, смоченными изопропанолом. Измеренная добротность после этой процедуры составила $Q = 6 \cdot 10^8$, что совпадало со значением добротности до нанесения плёнки нанотрубок.

В результате данного исследования была разработана методика нанесения ОУНТ на кристаллический микрорезонатор, методика очистки резонатора после нанесения нанотрубок и показано, что после удаления нанотрубок добротность резонатора не ухудшается.

Список литературы

1. Городецкий М.И. Микрорезонаторы с гигантской добротностью. М., 2011.
2. Tomoki S.L., et al. // J. Opt. Soc. Am. B. 2021. V. 38. P. 3172-3178.
3. Yamashita S. // Apl. Photonics. 2019. V. 4. P. 034301.

О.К. МАЛЫШЕВ, Т.А. ХАРИНОЕВА, И.Л. МАРТЫНОВ,
А.А. ЧИСТЯКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СПЕКТРОВ ОТРАЖЕНИЯ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ ИЗ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ В ВИДИМОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

Работа посвящена моделированию спектров отражения фотонных структур пористого кремния в видимой области спектра с учётом дисперсии показателя преломления, поглощения света и сорбции сторонних молекул в частично окисленной кремниевой структуре.

O.K. MALYSHEV, T.A. KHARINOEVA, I.L. MARTYNOV,
A.A. CHISTYAKOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

FEATURES OF SIMULATION THE REFLECTION SPECTRA OF POROUS SILICON PHOTONIC CRYSTALS IN THE VISIBLE SPECTRAL RANGE

This work is devoted to simulation of the reflection spectra of porous silicon photonic structures in visible spectral range taking into account dispersion of refractive index, light absorption and foreign molecules infiltration in partially oxidized silicon structure.

Пористый кремний (ПК) является одной из перспективных платформ для изготовления различных оптических и оптоэлектрических сенсоров [1]. Изготовление образцов ПК методом электрохимического травления позволяет варьировать размеры пор в широких пределах что, позволяет достигать удельной площади поверхности $\sim 500 \text{ m}^2/\text{g}$ [2]. Высокая удельная площадь поверхности приводит к активной сорбции молекул окружающей среды в сенсорном элементе. Принцип работы значительного числа сенсоров на ПК основан на оптическом измерении изменения диэлектрической проницаемости пористого слоя, обусловленного сорбцией молекул [1, 3]. Чувствительность такого рода сенсоров можно повысить путём формирования из ПК сложных фотонных структур (брэгговских зеркал и микрорезонатором), обладающих узкими резонансными линиями и резкими границами фотонной запрещённой зоны. Такой подход позволяет регистрировать малые изменения диэлектрической проводимости сенсорного элемента.

Предварительное моделирование оптических свойств является актуальной задачей при изготовлении сенсорных элементов, представляющих собой фотонные кристаллы из ПК. В видимой и ближней УФ-области оптического спектра задача усложняется ввиду резкой зависимости комплексного показателя преломления кремния от длины волны света [4].

В рамках настоящей работы создана модель, позволяющая методом матриц переноса рассчитывать спектры отражения фотонных структур из ПК для видимой области спектра с учётом дисперсии показателя преломления, межзонного поглощения и частичного окисления кремниевой структуры. Также модель позволяет прогнозировать искажение спектра отражения получаемых фотонных структур при сорбции на поверхности органических молекул. Особенностью данной работы является использование при расчётах трёхкомпонентной модели эффективной среды Брюгемана и возможность учитывать погрешность изготовления образцов.

Для проверки предложенного подхода были проведены эксперименты по заполнению пор термически окисленных брэгговских зеркал из ПК различными органическими растворителями (метанолом, толуолом и ацетонитрилом). Исследуемые образцы были изготовлены методом электрохимического травления монокристаллического кремния с центром фотонной запрещённой зоны, находящемся в диапазоне длин волн 500 - 650 нм. Проведены измерения спектров отражения фотонных кристаллов (рис. 1).

Продemonстрировано хорошее совпадение расчётных и экспериментально зарегистрированных спектров отражения исследуемых структур до принудительного окисления и после (рис. 2). Эмпирический показатель степени окисления составил $\sim 40\%$ для всех образцов. Также было показано что погрешность изготовления образцов удовлетворительного качества не должна превышать $\sim 15\%$. Полученные результаты могут быть использованы для расчёта оптических параметров различных фотонных структур из ПК и гибридных систем на их основе, предназначенных для работы в видимой области оптического спектра.

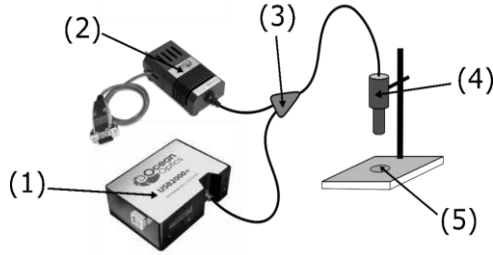


Рис. 1. Схема установки для измерения спектров отражения ФК:
1 – оптический спектрометр, 2 – галогеновая лампа, 3 – раздвоенный оптический волновод, 4 – оптический зонд, 5 – исследуемый образец

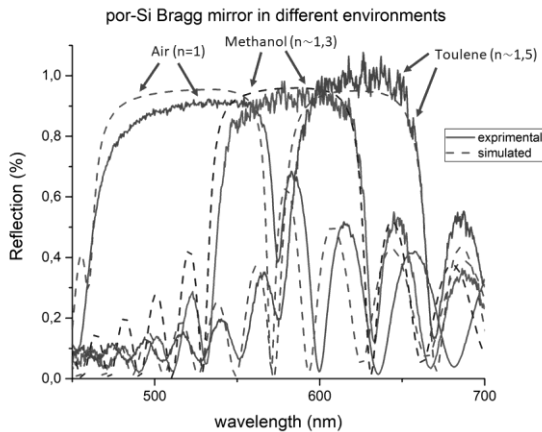


Рис. 2. Экспериментальные спектры отражения брэгговского зеркала, помещённого в разные среды и сравнение их с модельными

Список литературы

1. Levitsky I.A. Porous silicon structures as optical gas sensors // Sensors (Switzerland). 2015. V. 15. No. 8. P. 19968-19991.
2. Loni A., et al. Porous silicon fabrication by anodisation: Progress towards the realization of layers and powders with high surface area and micropore content // Microporous Mesoporous Mater., 2015. V. 213. P. 188-191.
3. Orosco M.M., Pacholski C., Sailor M.J. Real-time monitoring of enzyme activity in a mesoporous silicon double layer // Nat. Nanotechnol. 2009. V. 4. No. 4. P. 255-258.
4. Dovzhenko D.S., et al. Modeling of the optical properties of porous silicon photonic crystals in the visible spectral range // Opt. Spectrosc. 2017. V. 122. No. 1. P. 79-82.

А.В. ПРОХОРОВ^{1,2}, В.С. ВОЛКОВ², А.Б. ЕВЛЮХИН³

¹*Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых*

²*Московский физико-технический институт*

(национальный исследовательский университет), Долгопрудный

³*Ганноверский университет им. Лейбница, Ганновер, Германия*

ФОТОННЫЕ СВЯЗАННЫЕ СОСТОЯНИЯ В МЕТАПОВЕРХНОСТЯХ НА ОСНОВЕ НАНОЧАСТИЦ ИЗ ДИХАЛЬКОГЕНИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

Теоретически исследован эффект узкополосного резонансного поглощения в метаповерхностях, состоящих из сильно анизотропных слабопоглощающих наночастиц MoS_2 . Показано, что такие системы могут быть настроены на получение узкого пика поглощения на длине волны 1553 нм с эффективностью поглощения 51 %, добротностью резонанса 310 и чувствительностью 380 нм на единицу изменения показателя преломления окружающей среды.

A.V. PROKHOROV^{1,2}, V.S. VOLKOV², A.B. EVLYUKHIN³

¹*Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs*

²*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny*

³*Leibniz University, Hannover, Germany*

PHOTON BOUND STATES IN METASURFACES BASED ON NANOPARTICLES FABRICATED FROM DICHALCOGENIDES OF TRANSITION METAL

The effect of narrowband resonant absorption in metasurfaces consisting of strongly anisotropic weakly absorbing MoS_2 nanoparticles is theoretically investigated. We show that such systems can be tuned to produce a narrow absorption peak at 1553 nm with the absorption efficiency of about 51 %, Q-factor of resonance 310 and sensitivity 380 nm with a change per unit of the refractive index of the environment.

В настоящее время большой практический интерес представляет разработка сверхузкополосных поглотителей. Недавние исследования были сосредоточены на разработке полностью диэлектрических поглотителей и сенсоров, для которых высокий уровень поглощения достигается за счёт согласования импедансов и объединения электрических и магнитных дипольных резонансов на одной и той же частоте в метаматериале, изготовленном из слабо поглощающих наночастиц, например, сплошных дисков из Si [1].

В настоящей работе исследуются оптические свойства метаповерхностей, состоящих из MoS_2 наноцилиндров (НЦ), слои которых расположены перпендикулярно основанию цилиндра, параллельно плоскости yOz (рис. 1а). Каждый НЦ имеет радиус R_2 и смещённое от центра сквозное отверстие с радиусом R_1 . Условия облучения показаны на рис. 1а. Были оптимизированы и найдены такие параметры одиночного НЦ, при которых сильная анизотропия дисперсии MoS_2 обеспечивает бианизотропный магнитный дипольный резонанс вблизи телекомовой длины волны, что связано с сильной концентрацией магнитного поля в отверстии. Коллективный эффект синхронизации отдельных магнитных моментов, направленных вдоль оси z , в бесконечном массиве НЦ с периодом P может привести к появлению узкого резонанса, связанного с возбуждением квазизапертых мод (КЗМ) [2]. При этом, на длине волны КЗМ наблюдается резонансное увеличение поглощения света метаповерхностью. При выбранных условиях и $P = 4.12R_2$ эффективность поглощения составила $A = 0.51$ для $\lambda_{\text{КЗМ}} = 1553 \text{ нм}$ с добротностью порядка 310 для полной ширины пика поглощения на полувысоте равной всего 5 нм (рис. 1б). Кроме того, система имеет высокую чувствительность 380 нм на единицу изменения показателя преломления окружающей среды. Полученные результаты могут быть использованы для создания нанопокровов для узкополосного подавления ИК-сигналов и создания поляризационно-чувствительных распределённых сенсоров с высокой добротностью.

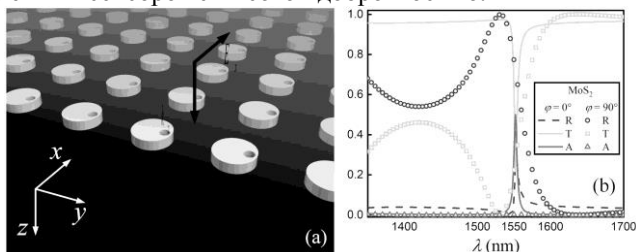


Рис. 1. Модель метаповерхности из MoS_2 дисков (а), отражение (R), пропускание (T) и поглощение (A) MoS_2 метаповерхности при разных углах ориентации поляризации падающей волны (б)

Работа выполнена в рамках госзадания ВлГУ ГБ-1187/3 (соглашение № 075-03-2020-046/1) и поддержана грантом РФФИ № 20-12-00343.

Список литературы

1. Fan K., Suen J.Y., et al. // Optica. 2017. V. 4 (6). P. 601.
2. Evlyukhin A.B., Tuz V.R., et al. // Phys. Rev. B. 2020. V. 101 (20). P. 205415.

Р.Г. БИКБАЕВ^{1,2}, Д.А. ПЫХТИН², С.Я. ВЕТРОВ^{2,1},
И.В. ТИМОФЕЕВ^{1,2}

¹*Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск*

²*Сибирский федеральный университет, Красноярск*

ПЛАЗМОННЫЕ МАССИВЫ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА НА ОСНОВЕ ТАММОВСКОГО ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОНА

В работе исследовано влияние формы плазмонной решётки на поглощающую способность активного слоя в органическом солнечном элементе на основе таммовского плазмон-поляритона. Расчёты выполнены в рамках теории связанных мод и подтверждены методом трансфер-матрицы. Показано, что наибольшее поглощение в активном слое достигается в случае гексагональной решётки.

R.G. BIKBAEV^{1,2}, D.A. PYKHTIN², S.Ya. VETROV^{2,1},
I.V. TIMOFEEV^{1,2}

¹*Kirensky Institute of Physics of FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk*

²*Siberian Federal University, Krasnoyarsk*

PLASMONICS ARRAYS TO IMPROVE THE ABSORPTION OF THE TAMM PLASMON POLARITON BASED SOLAR CELL

The influence of the plasmonic array type on the absorptivity of the active layer in a Tamm plasmon polariton based organic solar cell has been investigated in the framework of the temporal coupled mode theory and confirmed by the transfer matrix method. It has been shown that optimal absorption in the active layer is achieved in the case of hexagonal array.

Развитие солнечной энергетики идет по пути увеличения эффективности преобразования энергии, параллельно решая задачи увеличения надёжности и снижения себестоимости солнечных элементов. В связи с этим, широкое распространение получили методы манипуляции светом для увеличения поглощения в фоточувствительном слое за счёт внутреннего рассеяния или эффекта плазмонного резонанса. Так в работе [1] была экспериментально продемонстрирована возможность увеличения поглощения света в фотоактивном слое, содержащем наночастицы серебра. Актуальна идея использования допированного плазмонными наночастицами фоточувствительного слоя в качестве зеркала,

ограничивающего одномерный фотонный кристалл [2]. В этом случае, на их границе раздела локализуется ТПП [3].

В данной работе исследованы спектральные свойства органического солнечного элемента на основе таммовского плазмон-поляритона, локализованного на границе фотонного кристалла и фоточувствительного слоя с внедрённой квадратной или гексагональной плазмонной решёткой. Схематическое изображение солнечного элемента, рассмотренного нами, представлено на рис. 1. Толщина фоточувствительного слоя РЗНТ:PC61BM равна 70 нм, радиус наночастиц $r = 30$ нм. Расстояние между их центрами равно 65 нм. Толщина слоя PEDOT:PSS равна 20 нм.

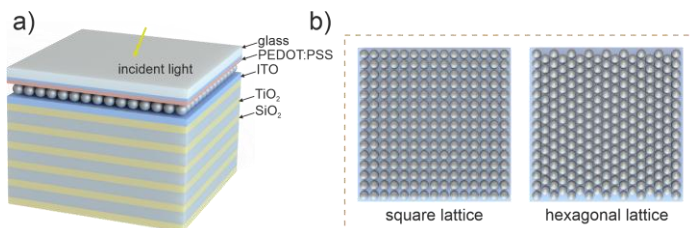


Рис. 1. Схематичное изображение ОСЭ, допированного плазмонными наночастицами (a) и схематичное изображение квадратной и гексагональной решётки (b)

Показано, что в предложенной модели интегральное поглощение в фоточувствительном слое, в случае внедрения в него квадратной и гексагональной решёток, увеличивается на 10 и 12 % соответственно, в сравнение с солнечным элементом без таммовского плазмон-поляритона. Проведены сравнительные расчёты интегрального поглощения в фоточувствительном слое, в случае определения его оптических свойств с помощью модели эффективной среды и с помощью прямого численного расчёта. Показано, что при малых объёмных концентрациях наночастиц в фоточувствительном слое (порядка 20 %), результаты, полученные двумя разными способами, хорошо согласуются.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (заявка МК-46.2021.1.2).

Список литературы

1. Duche D. et.al., // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2009. V. 93 (8). P. 1377-1382.
2. Бикбаев Р.Г., Ветров С.Я., Тимофеев И.В., Шабанов В.Ф. // ДАН, 2020. Т. 492. С. 54-57.
3. Kaliteevski M., et.al. // Phys. Rev. B. 2007. V. 76, P. 165415.

Д.А. КОПЫЛОВ, А.В. РАСПУТНЫЙ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ДВУХФОТОННЫХ СОСТОЯНИЙ В ПРОЦЕССЕ КАСКАДНОГО ГИПЕРПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РАССЕЯНИЯ

Приведены результаты теоретического анализа по генерации двухфотонных состояний в процессе КГПР. Показано, что при выполнении условий каскадных фазовых синхронизмов возможна генерация бифотонных состояний в антистоксовой области спектра.

D.A. KOPYLOV, A.V. RASPUTNYI

Lomonosov Moscow State University

STUDY OF BIPHOTON GENERATION BY SPONTANEOUS PARAMETRIC DOWN CONVERSION WITH CASCADED UP-CONVERSION

We present the results of theoretical analysis of cascaded up-conversion of spontaneous parametric down conversion. We show that the cascaded phase-matching conditions allow one to generate bi-photon states in anti-Stokes parts of the spectrum.

На сегодняшний день одной из актуальных задач квантовой оптики является приготовление неклассических состояний с определёнными спектральными и корреляционными свойствами. Одним из распространённых методов генерации неклассических полей является нелинейно-оптический процесс спонтанного параметрического рассеяния света (СПР), заключающийся в распаде одного фотона накачки и рождении двух других фотонов: сигнального и холостого [1]. Данный процесс происходит в нелинейных кристаллах с квадратичной нелинейной восприимчивостью и возможен при выполнении закона сохранения энергии. Поскольку сигнальный и холостой фотоны рождаются парами, между ними существует однозначная корреляция, и свет, получаемый в процессе СПР, является двухфотонным, причём оба фотона СПР являются низкоэнергетическими фотонами, по сравнению с волной накачки. Например, при использовании лазера накачки видимого диапазона оба фотона могут находиться в инфракрасной области спектра.

При распространении излучения в нелинейной среде одни и те же моды излучения могут участвовать в нескольких нелинейно-оптических

процессах. Такие процессы называются многоступенчатыми или каскадными процессами. Так при СПР сигнальный и холостой фотоны могут провзаимодействовать с волной накачки и преобразоваться по частоте вверх. Такой процесс называется каскадным гиперпараметрическим рассеянием (КГПР) [1]. Таким образом, на выходе из нелинейного кристалла помимо фотонов инфракрасного диапазона возможно наблюдение также излучения в ультрафиолетовой области спектра.

Эффект КГПР известен достаточно давно [2], однако только недавно было получено аналитическое решение [3] учитывающее ненулевую расстройку волновых векторов для всех нелинейных процессов, что позволило обнаружить новые режимы генерации КГПР, а именно существование каскадных фазовых синхронизмов для вынужденного режима генерации КГПР. Однако вопрос о статистике фотонов в спонтанном режиме при каскадных фазовых синхронизмах оставался открытым.

В данной работе представлены теоретические результаты по изучению квантовых состояний излучения КГПР при их генерации в спонтанном режиме при наличии каскадных фазовых синхронизмов. С использованием точного решения для операторов рождения и уничтожения [3], найденных в представлении Гейзенберга, методом Вей-Нормана [4] был восстановлен оператор пространственной эволюции, что позволило найти квантовое состояние на выходе из нелинейного кристалла в представлении Шредингера. Показано, что в общем случае итоговое состояние представляет собой суперпозицию всевозможных двухфотонных состояний, однако, при выполнении каскадных синхронизмов возможна эффективная генерация бифотонных состояний, когда один из фотонов является инфракрасным, а второй находится в ультрафиолетовой части спектра. Также в работе рассматривается возможность генерации бифотонных состояний в антистоксовой области, когда оба фотона являются ультрафиолетовым.

Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации МК-5886.2021.1.2.

Список литературы

1. Клышко Д.Н. Фотоны и нелинейная оптика. М.: Наука, 1980.
2. Smithers M., Lu E.Y.C. // Phys.Rev.A. 1974. V. 10. No.5. P. 1874.
3. Rasputnyi A.V., Kopylov D.A. // Phys.Rev.A. 2021. V. 104. P. 013702.
4. Wei J., Norman E. // Proc. of the American Math. Society. 1964. V. 15. No.2. P. 327-334.

А.Ю. АВДЕЕВА¹, Р.Г. БИКБАЕВ^{1,2}, С.Я. ВЕТРОВ^{2,1},
И.В. ТИМОФЕЕВ^{1,2}

¹*Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск*

²*Сибирский федеральный университет, Красноярск*

ТАММОВСКИЙ ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОН НА ГРАНИЦЕ МЕТАЛЛА И АНИЗОТРОПНОГО НАНОКОМПОЗИТА, СОПРЯЖЁННОГО С ФОТОННЫМ КРИСТАЛЛОМ

Теоретически исследовано расщепление таммовского плазмон-поляритона на границе раздела между металлом и анизотропным нанокompозитным слоем, сопряжённым с фотонным кристаллом. Показаны возможности управления положением и количеством таммовских мод в зависимости от поляризации падающей волны и толщины нанокompозитного слоя.

A.Yu. AVDEEVA¹, R.G. BIKBAEV^{1,2}, S.Ya. VETROV^{2,1},
I.V. TIMOFEEV^{1,2}

¹*Kirensky Institute of Physics of FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk*

²*Siberian Federal University, Krasnoyarsk*

SPLITTING A TAMM PLASMON POLARITON AT THE INTERFACE BETWEEN A METAL AND AN ANISOTROPIC NANOCOMPOSITE LAYER CONJUGATED WITH A PHOTONIC CRYSTAL

Splitting of a Tamm plasmon polariton at the interface between a metal and an anisotropic nanocomposite layer conjugated with a photonic crystal has been theoretically investigated. The possibilities of controlling the position and number of Tamm modes depending on the polarization of the incident wave and the thickness of the nanocomposite layer are shown.

Таммовский плазмон-поляритон (ТПП) – поверхностное состояние, локализованное на границе раздела двух зеркал и экспоненциально спадающее с увеличением расстояния от неё [1]. В качестве зеркал используются фотонные кристаллы (ФК), планарные металлические плёнки и другие материалы с отрицательной диэлектрической проницаемостью (ДП). В работе [2] для ФК-структуры, состоящей из плёнки серебра и слоя изотропного нанокompозита (НК), сопряжённого с одномерным ФК, продемонстрирован эффект расщепления ТПП при сближении частоты резонанса НК с частотой ТПП.

В данной работе рассмотрена ФК-структура, в которой изотропный слой НК заменён на анизотропный слой НК, состоящий из металлических наночастиц (НЧ) в форме эллипсоидов вращения, равномерно распределённых в диэлектрической матрице и ориентированных вдоль оси вращения. Эффективная ДП анизотропного НК, со свойствами одноосного вещества, в главных осях описывается в виде диагонального тензора [3].

Поляризационная чувствительность спектра отражения, полученная методом трансфер-матрицы, иллюстрируется на рис. 1. Видно, что, для волн продольной поляризации ТПП расщепляется на две моды (рис. 1а), при этом для поперечной поляризации расщепления не происходит (рис. 1б).

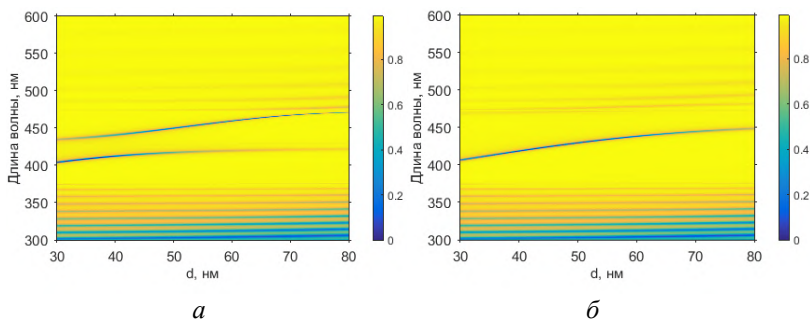


Рис. 1. Спектр отражения структуры в зависимости от d , для перпендикулярной (а) и параллельной (б) по отношению к оптической оси НК поляризации света, параметры серебряной плёнки и ФК приведены в [2], параметры анизотропного НК: $f = 0.01$; $\xi = 1,2$ – отношение длин полярной и экваториальной полуосей НЧ

Таким образом, изменение формы наночастиц в комбинации с изменением поляризации падающего света позволяют осуществить частотную перестройку спектра, что способствует созданию узкополосных светофильтров с перестраиваемыми полосами пропускания.

Список литературы

1. Kaliteevski M.A., et al. // Physical Review B. 2007. V. 76. No. 16. P. 165415.
2. Aydeeva A.Yu., et al. // JOSA B. 2021. V. 38. No. 5.
3. Бикбаев Р.Г. и др. // Ученые записки физического факультета МГУ. 2015. Т. 4. С. 154330-154332

Т.М. ЧМЕРЕВА, М.Г. КУЧЕРЕНКО, Ф.Ю. МУШИН
Оренбургский государственный университет

ТУШЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ КВАНТОВОЙ ТОЧКИ ПЛАЗМОННОЙ ОБОЛОЧЕЧНОЙ НАНОЧАСТИЦЕЙ

В рамках квантовомеханической теории возмущений рассчитана скорость переноса энергии электронного возбуждения от квантовой точки (КТ), находящейся в режиме сильного или слабого конфайнмента, к сферической наночастице (НЧ) с диэлектрическим ядром и металлической оболочкой. Показано, что скорость переноса резко возрастает при таких радиусах ядра НЧ, для которых частота плазмонного колебания определённой мультипольности совпадает с частотой электронного перехода в КТ.

T.M. CHMEREVA, M.G. KUCHERENKO, F.Yu. MUSHIN
Orenburg State University

QUENCHING OF ELECTRONIC EXCITATIONS OF A QUANTUM DOT BY A PLASMONIC SHELL NANOPARTICLE

Within the framework of the quantum mechanical perturbation theory, the transfer rate of the electron excitation energy from a quantum dot (QD) in the mode of strong or weak confinement to a spherical nanoparticle (NP) with a dielectric core and a metal shell is calculated. It is shown that the transfer rate increases sharply at such radii of the NP core for which the frequency of the plasmon oscillation of a certain multipole coincides with the frequency of the electron transition in the QD.

В работе проведено теоретическое исследование безызлучательного переноса энергии от возбуждённой КТ к оболочечной плазмонной НЧ. В оболочечной НЧ возможны два типа плазмонных колебаний [1]. Частоты колебаний первого типа уменьшаются с ростом радиуса R ядра НЧ и стремятся к частотам локализованных плазмонов в однородной НЧ при $R \rightarrow 0$. Частоты колебаний второго типа выше, чем первого, и растут с ростом R . Взаимодействие электрона КТ с электрическим полем локализованных плазмонов НЧ приводит к переходам электрона между различными состояниями. Скорость перехода может быть рассчитана по золотому правилу Ферми. Она будет резко возрастать при совпадении частоты плазмона с частотой перехода электрона в КТ, и как видно из рис. 1, такое совпадение возможно для низкочастотных плазмонов.

В условиях сильного конфайнмента для скорости переноса энергии от КТ к НЧ при межзонном переходе электрона справедливо выражение

$$U_{vc} = \frac{2\pi}{\hbar} \sum_{LM} \left| \int_{V_{KT}} \psi_{1s}^v(\mathbf{r}) \mathbf{e}_{r_{vc}} \cdot \mathbf{E}_{LM}(\mathbf{r}') \psi_{1s}^c(\mathbf{r}) d\mathbf{r} \right|^2 \delta(\hbar\omega_L - E_{vc}),$$

где $\mathbf{e}_{r_{vc}}$ – дипольный матричный элемент перехода электрона из зоны проводимости в валентную зону, $\psi_{1s}(\mathbf{r})$ – огибающая функция электрона, $\mathbf{E}_{LM}(\mathbf{r}')$ – напряжённость поля плазмона в области КТ, E_{vc} – энергия межзонного перехода электрона, $\hbar\omega_L$ – энергия низкочастотного плазмона. Для КТ в режиме слабого конфайнмента скорость переноса энергии к НЧ даётся формулой

$$U_{ex} = \frac{2\pi}{\hbar} \Phi_{1s}^2(0) \sum_{LM} \left| \int \psi_{1s}(\mathbf{r}) \mathbf{e}_{r_{vc}} \cdot \mathbf{E}_{LM}(\mathbf{r}') d\mathbf{r} \right|^2 \delta(\hbar\omega_L - E_{ex}),$$

где $\Phi_{1s}(0)$ – водородоподобная функция относительного движения электрона и дырки, E_{ex} – энергия экситонного перехода. Результаты расчётов скорости переноса энергии от КТ к НЧ при межзонном (сплошная кривая) и экситонном (штриховая кривая) переходах, полученные для НЧ с серебряной оболочкой, представлены на рис. 2.

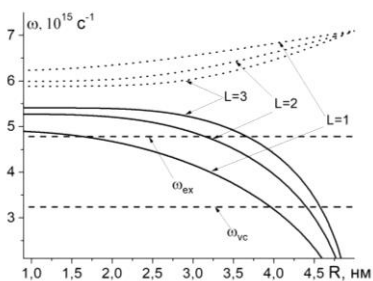


Рис. 1. Зависимость частоты локализованных плазмонов от радиуса ядра НЧ, радиус НЧ – 5 нм

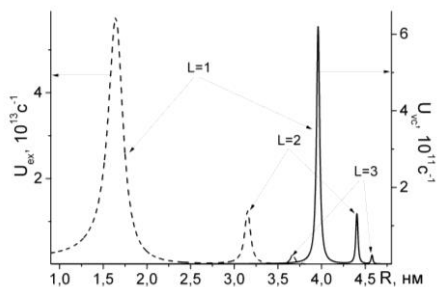


Рис. 2. Зависимость скорости переноса энергии от радиуса ядра НЧ

Исследование выполнено при поддержке Минобрнауки РФ, проект № FSGU-2020-0003.

Список литературы

1. Goliney I.Yu., Sugakov V.I., Valkunas L., Vertsimakha G.V. // Chem. Phys. 2012. V. 404. P. 116.

О.А. ШУТОВА, С.М. ТРУШИН

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ГЕНЕРАЦИЯ ГАРМОНИК АТОМАРНЫМИ ГАЗАМИ В ФОКУСЕ ТОРОИДАЛЬНЫХ МОД ЛАЗЕРНЫХ ПОЛЕЙ

В последнее время благодаря новым возможностям в эксперименте возрос интерес к созданию оптических вихрей в излучении высоких гармоник, управлению эффективностью их генерации и состоянием поляризации. Появились экспериментальные работы, в которых ГТВП происходит в оптических векторных полях [1 - 4]. Но в то же время, несмотря на большое количество экспериментов по ГТВП, пока не существует теории, аккуратно описывающий данный процесс. В настоящей работе используется непertурбативный подход [5], в рамках которого атом описывается при помощи точных трёхмерных волновых функций, таким образом, геометрия взаимодействия не сводится к одномерной. Анализ состояния поляризации гармоник производится с помощью формализма обобщённых параметров Стокса [6, 7].

O.A. SHOUTOVA, S.M. TRUSHIN

Lomonosov Moscow State University

GENERATION OF HARMONICS BY ATOMIC GASES AT THE FOCUS OF DOUGHNUT-MODES OF LASER FIELDS

Recently, due to new possibilities in experiment, interest has increased in the creation of optical vortices in the emission of high harmonics, control of the efficiency of their generation and the state of polarization. Experimental studies have appeared in which HHG occurs in optical vector fields [1 - 4]. But at the same time, despite the large number of experiments on HHG, there is no theory yet that accurately describes this process. In this work, we use a nonperturbative approach [9], within which the atom is described using exact three-dimensional wave functions, thus, the geometry of the interaction is not reduced to one-dimensional. The analysis of the polarization state of harmonics is carried out using the formalism of the generalized Stokes parameters [6, 7].

В работе теоретически рассмотрен процесс ГТВП в разреженной атомарной среде, локализованной вблизи фокальной плоскости, под действием векторных пучков в различной геометрии, задаваемых в рамках теории Ричардса-Вольфа (Дебая), решения которой имеют неоднородную амплитудно-фазовую структуру в фокальной плоскости. В экспериментах по ГТВП атомарными газами, как правило, в качестве среды используются благородные газы, в проводимом нами численном

эксперименте мы рассматривали газ неона. Анализ поляризационного состояния гармоник проводился с помощью обобщённых параметров Стокса. Эти параметры учитывают третью компоненту поля, в отличие от классических параметров Стокса, которые описывают поведение произвольного двумерного поля. Обобщённые параметры Стокса дают полную информацию о поведении поля: степень и вид поляризации, её направление и положение в пространстве. Описывались случаи разных пространственных мод падающего поля: гауссова, радиальная, азимутальная, и комбинация радиальной и азимутальной моды, так называемая гибридная, представляющей сумму одноцветных полей радиальной и азимутальной моды с задержкой в $\pi/2$. На рис. 1 показаны параметры поляризации для третьей гармоники, генерируемой при воздействии на атомную среду гибридной поляризацией. Полученные результаты позволяют следить за исчезновением вихревой компоненты поля по мере удаления от фокальной плоскости.

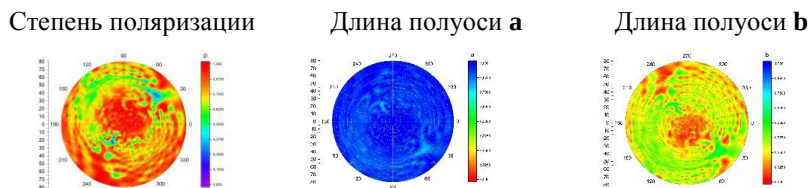


Рис 1. Полученные с помощью обобщённых параметров Стокса параметры поляризации генерируемой третьей гармоники на расстоянии $z = 45\lambda$ от фокальной плоскости

Список литературы

1. Lin Q., Li S., Becker W. High-order harmonic generation in a tightly focused laser beam // Optics letters. 2006. V. 31, No. 14. P. 2163-2165.
2. Patchkovskii S., Spanner M. High harmonics with a twist // Nature physics. 2012. V. 8.
3. Trob J., Trallero-Herrero C.A. High harmonic generation spectroscopy via orbital angular momentum // J. Chem. Phys. 2019. V. 151. P. 084308.
4. Gui G., Brooks N.J., Kapteyn H.C., et al. Second-harmonic generation and the conservation of spatiotemporal orbital angular momentum of light // Nat. Photon. 2021. V. 15. P. 608-613.
5. Андреев А.В., Стремоухов С.Ю., Шутова О.А. Продольный ток, индуцируемый плоской электромагнитной волной в одиночном атоме // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2018. Т. 154. № 1. С. 31-43.
6. Sheppard C.J.R. Jones and Stokes parameters for polarization in three dimensions // Phys. Rev. A. 2014. V. 90. P. 023809.
7. Setälä T., Shevchenko A., Kaivola M., Friberg A.T. Degree of polarization for optical near fields // Phys. Rev. E. 2002. V. 66. P. 016615.

А.В. ШИРОКОВА, М.И. БАКУНОВ, А.В. МАСЛОВ

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

АДИАБАТИЧЕСКОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В НЕСТАЦИОНАРНОЙ СРЕДЕ ИЗ ОСЦИЛЛЯТОРОВ

Получены материальные уравнения для нестационарной среды, состоящей из совокупности классических осцилляторов, плотность которых изменяется во времени, а также для среды с изменяющейся собственной частотой осцилляторов. Исследовано преобразование электромагнитной волны, распространяющейся в среде с параметрами, медленно меняющимися по сравнению с периодом волны. Найдены комбинации энергии и частоты волны, сохраняющиеся во времени (адиабатические инварианты).

A.V. SHIROKOVA, M.I. BAKUNOV, A.V. MASLOV

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

ADIABATIC EVOLUTION OF ELECTROMAGNETIC WAVES IN A NONSTATIONARY MEDIUM MADE OF OSCILLATORS

Constitutive relations for a nonstationary medium made of classical oscillators with a time-varying oscillators density and medium with a time-varying intrinsic frequency of oscillators are obtained. To study the transformation of an electromagnetic wave propagating in a medium made of oscillators we found combinations of wave energy and frequency that are conserved in time (adiabatic invariants).

Для разработки новых устройств активной фотоники и плазмоники необходимо теоретическое описание электромагнитных явлений в нестационарных средах и структурах. В частности, среда, состоящая из осцилляторов, плотность которых резко увеличивается во времени, предложена как модель для описания метаматериалов с метаатомами, активируемыми внешним источником [1, 2]. Преобразование электромагнитных волн при резком изменении плотности осцилляторов в среде описано в недавних работах [1, 3]. В данной работе исследована более реалистичная ситуация медленного по сравнению с периодом волны изменения плотности осцилляторов.

Для исследования медленного (адиабатического) преобразования электромагнитной волны необходимо получить материальное уравнение для нестационарной среды из осцилляторов. Выведенное в данной работе

материальное уравнение для такой среды имеет разный вид в случаях, когда нестационарность среды обусловлена:

- увеличением плотности осцилляторов,
- уменьшением плотности осцилляторов,
- изменением собственной частотой осцилляторов.

Для получения адиабатического инварианта, то есть комбинации энергии и частоты волны, сохраняющей своё значение во времени, решаем систему уравнений Максвелла, дополненную полученным материальным уравнением. Для среды из осцилляторов с изменяющейся во времени плотностью осцилляторов получаем инварианты вида: $W(\omega^2 - \Omega^2)/\omega = \text{const}$ – для случая возрастания плотности осцилляторов и $W\omega/(\omega^2 - \Omega^2) = \text{const}$ – для случая убывания плотности осцилляторов. Как следует из полученных инвариантов, изменение частоты волны сопровождается уменьшением её энергии (рис. 1).

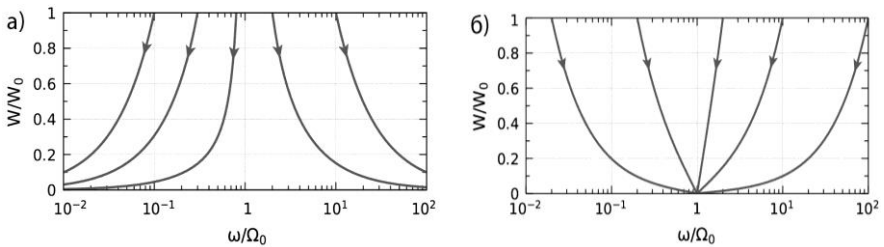


Рис. 1. Энергия волны в зависимости от частоты волны для увеличения (а) и уменьшения (б) плотности осцилляторов во времени

Для среды с изменяющейся собственной частотой осцилляторов инвариант принимает вид: $W/\omega = \text{const}$. Данный инвариант справедлив как при увеличении, так и при уменьшении собственной частоты. Из инварианта следует, что в случае увеличения собственной частоты энергия волны увеличивается, а в случае уменьшения собственной частоты – уменьшается.

Список литературы

1. Qu K., Jia Q. et. al. // Phys. Rev. E. 2018. V. 98. P. 023202.
2. Lee K., Son J. et. al. // Nature Photon. 2018. V. 12. P. 765.
3. Maslov A.V., Erykalin A.A., Bakunov M.I. // Phys. Rev. E. 2021. V. 103. P. 043207.

Г.М. ШИШКОВ, К.С. ГРИГОРЬЕВ, В.А. МАКАРОВ
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

СИНГУЛЯРНОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПРИ САМОФОКУСИРОВКЕ ЭЛЛИПТИЧЕСКИ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА В ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ

Приведены результаты моделирования распространения эллиптически поляризованного гауссова пучка в изотропной фазе нематического (НЖК) и холестерического (ХЖК) жидких кристаллов вблизи температуры перехода в мезофазу. Описаны основные закономерности самофокусировки и рождения поляризационных сингулярностей.

G.M. SHISHKOV, K.S. GRIGORIEV, V.A. MAKAROV
Lomonosov Moscow State University

POLARIZATION SINGULARITIES IN THE SELF-FOCUSING OF AN ELLIPTICALLY POLARIZED LIGHT IN LIQUID CRYSTALS

The results of modeling of the propagation of an initially elliptically polarized Gaussian beam in the isotropic phase of nematic (NLC) and cholesteric (CLC) liquid crystals near the transition temperature to the mesophase are presented. The main laws governing self-focusing and the nucleation of polarization singularities are described.

Распространяющийся в толще холестерического или нематического жидкого кристалла лазерный пучок испытывает нелинейное воздействие среды, которое, может приводить к его самофокусировке [1 - 3]. Распространение пучка в толще холестерического жидкого кристалла имеет отличительные особенности: при самофокусировке среда оказывает «предпочтение» определённому значению его степени эллиптичности (рис. 1b).

Учёт поляризации излучения в задаче позволил обнаружить особые точки в отдельных поперечных сечениях пучка. В них изначально эллиптическая поляризация вырождается в чисто круговую. Множества этих точек в поперечных сечениях пучка представляют собой окружности. Сечения пучка, в которых содержатся данные *C*-линии, отмечены на рис. 1 чёрными вертикальными линиями. Сингулярности поляризации каждой из компонент, как правило, возникают в поперечных сечениях пучка близких к локальным максимумам или минимумам интенсивности

данной поляризационной компоненты на оси пучка. Отношение интенсивности в точке сингулярности к интенсивности в центре пучка в том же поперечном сечении позволяет судить о видности γ той или иной сингулярности. Наиболее яркой является «первичная» [4] сингулярность, образующаяся вблизи входной границы среды (обозначены звёздочкой на рис. 1а и 1с). Было обнаружено, что уединённые первичные сингулярности поляризации, могут при определённых условиях распадаться: после малого изменения значения одного из параметров задачи, M_0 (начальная степень эллиптичности) или P (безразмерная мощность), в поле пучка возникают три или более близлежащих линий сингулярности. Данный распад, например, происходит на границах выделенных пунктиром тёмных областей на рис. 2.

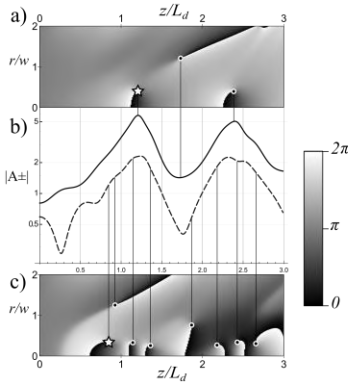


Рис. 1. Зависимости интенсивности (b) и фазы право- (a) и лево- (c) поляризованной компонент от координат распространения пучка

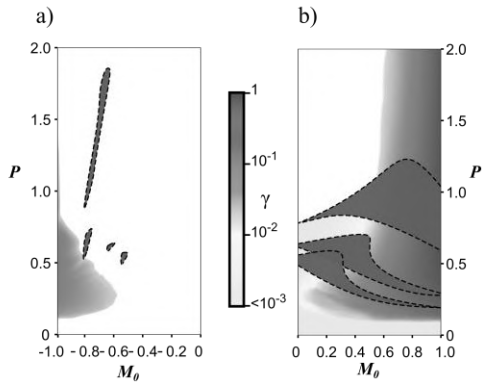


Рис. 2. Диаграммы видности первичных сингулярностей лево- (a) и право- (b) поляризованной компонент

Список литературы

1. Blinov L.M. // In Advances in Liquid Crystal Research and Applications. 1981. P. 1083-1106.
2. Boyd R.W., Lukishova S.G., Shen Y.R. Self-focusing: Past and Present. Springer. 2009.
3. Makarov V.A., Grigoriev K.S., Shishkov G.M. // Molecular Crystals and Liquid Crystals. 2017. V. 650 (1). P. 23-31.
4. Grigoriev K.S., Makarov V.A. // J. Opt. Soc. Am. B. 2019. V. 36 (6). P. 1690-1694.

В.В. ИВАХНИК, Д.Р. КАПИЗОВ, В.И. НИКОНОВ,
*Самарский национальный исследовательский университет
им. акад. С.П. Королева*

КАЧЕСТВО ОБРАЩЕНИЯ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ПРИ ЧЕТЫРЁХВОЛНОВОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ В МНОГОМОДОВОМ ВОЛНОВОДЕ С ТЕПЛОВОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ

Для четырёхволнового преобразователя излучения в двумерном многомодовом волноводе с тепловой нелинейностью проанализировано влияние пространственной структуры волн накачки на качество обращения волнового фронта. Показано, что по мере уменьшения радиуса гауссовых волн накачки на гранях волновода, качество обращения волнового фронта улучшается. В двумерном волноводе с бесконечно проводящими поверхностями показано наличие точек «генерации», вблизи которых наблюдается резкое увеличение амплитуды объектной волны, вид которой полностью определяется одной из мод волновода.

V.V. IVAKHNIK, D.R. KAPIZOV, V.I. NIKONOV
Samara National Research University

QUALITY OF WAVEFRONT REVERSAL FOR FOUR-WAVE INTERACTION IN A MULTIMODE WAVEGUIDE WITH THERMAL NONLINEARITY

For a four-wave radiation converter in a two-dimensional multimode waveguide with thermal nonlinearity the influence of the spatial structure of pump waves on the quality of wavefront reversal is analyzed. It is shown that with a decrease in the radius of Gaussian pump waves on the waveguide edges, an improvement in the quality of wavefront reversal. In a two-dimensional waveguide with infinitely conducting surfaces, the presence of "generation" points is shown, near which acute increase in the object wave amplitude is observed, and its form is completely determined by one of the waveguide modes.

Одной из важных характеристик четырёхволнового преобразователя излучения является качество преобразования (качество обращения волнового фронта (ОВФ)), оцениваемое по соответствию комплексных амплитуд падающей (сигнальной) на такой преобразователь и отражённой (объектной) волн. В приближении заданного поля по волнам накачки одним из широко используемых методов исследования качества ОВФ

многоволновыми преобразователями излучения является метод, основанный на нахождении и последующем анализе функции размытия точки (ФРТ) [1].

В настоящей работе при малом коэффициенте отражения с использованием метода ФРТ исследовано влияние на качество ОВФ четырёхволновым преобразователем излучения в волноводах с тепловой нелинейностью пространственной (гауссовой) структуры волн накачки. В качестве волноводов рассматривались двумерный волновод с бесконечно проводящими поверхностями и неограниченный двумерный волновод с параболическим распределением показателя преломления. Показано, что уменьшение радиуса первой гауссовой волны накачки, распространяющейся в направлении сигнальной волне, приводит к незначительному изменению, а радиуса второй волны накачки, распространяющейся навстречу сигнальной волне, к существенному уменьшению полуширины модуля ФРТ. Получены выражения, устанавливающие связь полуширины модуля ФРТ с радиусами волн накачки

При больших коэффициентах отражения, когда необходимо учитывать перекачку энергии из объектной волны в сигнальную, самодифракцию волн накачки, для четырёхволнового преобразователя излучения в многомодовом волноводе с бесконечно проводящими поверхностями проанализировано изменение коэффициентов в разложении объектной волны по модам волновода с увеличением интенсивности волн накачки. Показано наличие точек «генерации», вблизи которых коэффициент отражения одной из мод волновода, формирующей объектную волну, принимает максимальное значение. По мере приближения к r -ой точке «генерации» увеличивается вклад в амплитуду объектной волны r -ой моды волновода, качество ОВФ ухудшается.

Список литературы

1. Ивахник В.В. Обращение волнового фронта при четырёхволновом взаимодействии. Самара: Самарский университет, 2010.

М.А. КУРНИКОВ, А.В. ШИРОКОВА, А.В. МАСЛОВ,
М.И. БАКУНОВ

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

ДИСПЕРСИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ТРАНСФОРМАЦИИ ВОЛН НА ВРЕМЕННОЙ ГРАНИЦЕ

В настоящей работе для описания распространения света в динамической среде применяется наиболее общая модель – среда Лоренца. Для рассматриваемой модели среды приведены результаты численного моделирования рассеяния электромагнитного импульса на временной границе, определяющие область применимости традиционной модели временного скачка диэлектрической проницаемости в бездиспергирующих диэлектриках.

M.A. KURNIKOV, A.V. SHIROKOVA, A.V. MASLOV,
M.I. BAKUNOV

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

DISPERSIVE EFFECTS DURING WAVE TRANSFORMATION AT THE TEMPORAL BOUNDARY

In this paper, a more general model, the Lorentz medium, is used to describe the light propagation in the dynamic medium. For the considered model of a medium, the results of numerical modeling of the electromagnetic pulse scattering at the temporal boundary are presented to determine the realms of applicability of the conventional model of the temporal discontinuity in the permittivity of a nondispersive dielectric.

В последние несколько лет динамические среды стали объектом значительного интереса среди научного сообщества, что связано с развивающимися областями активной фотоники и плазмоники, основанных на использовании изменяющихся во времени метаматериалов и метаповерхностей. Динамические среды открывают новые возможности для управления светом, такие как: широкополосный частотный сдвиг, отрицательное затухание и временное прицеливание.

Для описания рассеяния волн на временной границе в динамической среде, как правило, используется модель бездиспергирующей диэлектрической проницаемости $\epsilon(t)$ [1]. Однако, на временной границе частота волны не сохраняется, и, следовательно, частотный сдвиг низкочастотной исходной волны может сопровождаться возбуждением дисперсионных высокочастотных мод.

В недавних работах [2, 3] для исследования динамических сред было предложено использовать более общую модель динамической среды – среду Лоренца, совокупность классических осцилляторов, плотность которых изменяется со временем. Исследования этой модели показывают,

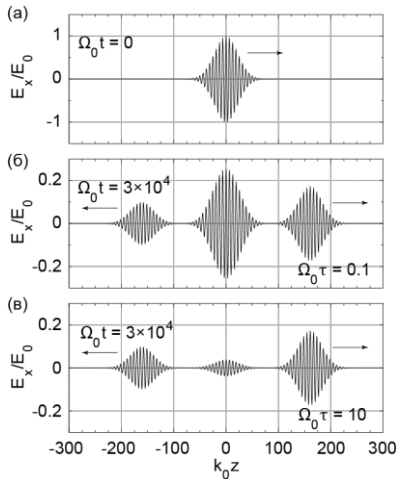


Рис. 1. Исходный электромагнитный импульс в момент времени $t = 0$ (а), возбуждённые волны при $\tau^{-1} \gg \omega_{1,2}$ (б) и $\omega_2 \gg \tau^{-1} \gg \omega_1$ (в) соответственно, волны на частоте ω_1 смещены по краям относительно места возбуждения ($z = 0$), волны на частоте ω_2 остаются неразделёнными в месте возбуждения

на частотах много меньших резонансной частоты осцилляторов.

В данной работе для определения области применимости модели $\varepsilon(t)$ был проведён численный расчёт рассеяния электромагнитного импульса на временной границе в среде Лоренца с быстрорастущей плотностью её структурных элементов (рис. 1). В приведённых расчётах скорость изменения состояния среды определяется параметром τ , а собственная частота осцилляторов – параметром Ω_0 ($\Omega_0 = 50\omega_0$, где ω_0 – центральная частота исходного импульса). При выполнении условия $\tau^{-1} \gg \omega_{1,2}$ после рассеяния импульса на временной границе происходит возбуждение как низкочастотных волн на частоте ω_1 , так и высокочастотных волн на частоте ω_2 (рис. 1б). Если же $\omega_2 \gg \tau^{-1} \gg \omega_1$, то возбуждаются только низкочастотные волны, что соответствует решению при рассмотрении модели $\varepsilon(t)$.

Отметим, что модель $\varepsilon(t)$ неприменима для сред с уменьшающейся плотностью осциллирующих диполей даже в бездисперсионном пределе [4].

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (075-15-2020-927).

Список литературы

1. Morgenthaler F.R. // IRE Trans. Microw. Theory Tech. 1958. V. 6. P. 167.
2. Qu K., Jia Q., Edwards M.R., Fisch N.J. // Phys. Rev. E. 2018. V. 98. P. 023202.
3. Maslov A.V., Erykalin A.A., Bakunov M.I. // Phys. Rev. E. 2021. V. 103 P. 003200.
4. Bakunov M.I., et. al. // Optics Letters. 2021. V. 46. P. 4988.

А.А. АКИМОВ, С.А. ГУЗАЙРОВ, В.В. ИВАХНИК
*Самарский национальный исследовательский университет
им. акад. С.П. Королева*

ЧЕТЫРЁХВОЛНОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТЕПЛОВОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ ПРИ НАЛИЧИИ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ НА СИГНАЛЬНУЮ ИЛИ ОБЪЕКТНУЮ ВОЛНЫ

Рассмотрено влияние обратной связи, реализуемой по сигнальной или объектной волнам с помощью кольцевого резонатора, на амплитудные и пространственные характеристики четырёхволнового преобразователя излучения с тепловой нелинейностью. Показано, что при равных интенсивностях волн накачки значения амплитудных коэффициентов отражения четырёхволнового преобразователя, полуширин полос пространственных частот объектной волны совпадают при наличии обратной связи на сигнальную или объектную волны.

A.A. AKIMOV, S.A. GUZAIROV, V.I. IVAKHNIK
Samara National Research University, Russia

FOUR-WAVE RADIATION CONVERTER ON THERMAL NONLINEARITY WITH FEEDBACK ON SIGNAL OR OBJECT WAVES

The influence of feedback for signal or object waves using a ring resonator on the amplitude and spatial characteristics of a four-wave radiation converter with thermal nonlinearity has been considered. It has been shown, that the values of amplitude reflection coefficients of the four-wave radiation converter and the half-widths of spatial frequencies bands of object wave match in the presence of feedback for signal or object waves at equal pump intensities.

Повышение эффективности четырёхволновых преобразователей излучения является важной задачей, возникающей при исследовании многоволновых процессов в нелинейно-оптических средах [1]. Одним из способов решения этой задачи является использование положительной обратной связи, накладываемой на взаимодействующие волны. Наложение обратной связи на объектную и сигнальную волны позволяет более чем на порядок повысить коэффициент отражения четырёхволновых преобразователей излучения в средах с керровской, тепловой нелинейностями [2].

Однако существуют оптические схемы четырёхволнового взаимодействия, например, четырёхволновое взаимодействие в схеме со встречными волнами накачки и ортогонально поляризованными сигнальной и объектной волнами, для которой реализация внешней обратной связи одновременно как на объектную, так и на сигнальную волны не всегда возможна.

Представляет интерес исследование влияния обратной связи, реализуемой при помощи кольцевого резонатора, на амплитудные и пространственные характеристики четырёхволнового преобразователя излучения на тепловой нелинейности при наличии обратной связи только на сигнальную или объектную волны.

В работе рассматривается процесс вырожденного четырёхволнового взаимодействия ($\omega + \omega - \omega = \omega$) в среде с тепловой нелинейностью, расположенной внутри кольцевого резонатора.

Четырёхволновое взаимодействие описывается с помощью уравнения Гельмгольца, которое дополняется уравнением Пуассона. Использовалось приближение заданного поля по волнам накачки и параксиальное приближение. Учитывались динамические решётки показателя преломления, связанные с интерференцией сигнальной волны с первой волной накачки и объектной волны со второй волной накачки. При условии, что волны накачки плоские получена система связанных дифференциальных уравнений для пространственных спектров сигнальной и объектной волн. Система уравнений анализировалась численным методом путём рассмотрения многократного прохождения сигнальной и объектной волн через нелинейный слой в кольцевом резонаторе.

Численный анализ системы уравнений показывает, что амплитудные коэффициенты отражения четырёхволнового преобразователя излучения, полуширины полос пространственных частот совпадают при наличии обратной связи на сигнальную или объектную волны. Установлено, что отличие в амплитудных коэффициентах отражения при наличии и отсутствии обратной связи по объектной волне с ростом интенсивности волн накачки уменьшается. Показано улучшение качества обращения волнового фронта с ростом интенсивности волн накачки при наличии обратной связи по объектной или сигнальной волнам.

Список литературы

1. Ивахник В.В. Обращение волнового фронта при четырёхволновом взаимодействии. / Самара: Самарский университет, 2010.
2. Акимов А.А., Гузаиров С.А., Ивахник В.В. // Компьютерная оптика. 2021. Т. 45. № 5. С. 667-672.

А.В. БЕЛИНСКИЙ, Р. СИНГХ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

**О ВОЗМОЖНОСТИ РАССМОТРЕНИЯ КВАНТОВЫХ
ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТА
ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КВАНТОВЫХ ФАНТОМНЫХ
ИЗОБРАЖЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ВСТРЕЧНОГО
ЧЕТЫРЁХФОТОННОГО СМЕШЕНИЯ**

Теоретически изучены квантовые поляризационные характеристики света в процессе встречного четырёхфотонного смешения. Рассмотрена возможность формирования квантовых фантомных изображений с помощью квантовых поляризационных характеристик света. Установлено, что поляризационные характеристики света (встречных поляризационных мод) могут потенциально улучшить качество квантовых фантомных изображений в дополнении к фотонной корреляции второго порядка.

A.V. BELINSKY, R. SINGH

Lomonosov Moscow State University

**ON THE POSSIBILITY OF ANALYSIS OF QUANTUM
POLARIZATION CHARACTERISTICS OF LIGHT
IN THE FORMING OF QUANTUM GHOST IMAGES
IN THE PROCESS OF COUNTERPROPAGATING
FOUR-WAVE MIXING**

Theoretically quantum polarization characteristics of light in the process of counterpropagating four-wave mixing are studied. The possibility of forming of quantum ghost images using the quantum polarization characteristics of light is considered. It is found that the polarization characteristics of light (orthogonal polarized modes) can potentially improve the quality of quantum phantom images in addition to the second order photon correlation.

Пусть в кристалле с кубической нелинейностью $\chi^{(3)}$ распространяются 4 стационарные, вырожденные по частоте ω плоские монохроматические моды $\hat{a}_j(x, y, z)$ $j \in \overline{1, 4}$ (рис. 1). Моды 1 и 2 распространяются навстречу друг другу и не истощаются. Моды 3 и 4 ортогонально поляризованы, генерируются внутри кристалла и распространяются по противоположной стороне оси z . Операторные

уравнения для мод 1 и 2 опускаются, так как они не истощаются, а для мод 3 и 4 имеют вид [1 - 4]:

$$\frac{\partial \hat{a}_{3,4}(x, y, z)}{\partial z} \pm i \frac{1}{2k_z} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \hat{a}_{3,4}(x, y, z) = \pm i \gamma \hat{a}_{4,3}^+(x, y, z), \quad (1)$$

где $\gamma = \frac{3\pi\omega^2}{k_z c^2} \chi^{(3)}$ – нелинейный коэффициент связи. Систему операторных

уравнений (1) можно решить аналитически с помощью, например, преобразования Лапласа и Фурье. Квантовые статистические характеристики поляризационных состояний света вычислены с помощью операторов Стокса, их шумов и зависимость от дифракции в случае, когда моды 3 и 4 находились в вакуумном состоянии.

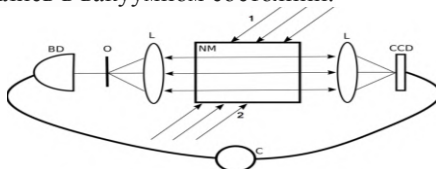


Рис. 1. Схема формирования фантомного изображения при встречном четырёхфотонном смешении с параллельным ходом лучей между объективами L и нелинейной средой NM с кубичной нелинейностью; в прозрачном нелинейном кристалле с кубичной нелинейностью $\chi^{(3)}$ пары фотонов накачки преобразуются в пары сигнального и холостого фотонов, 1, 2 – встречные моды накачки; моды запутанных пар фотонов освещают объект O и матрицу фотодетекторов CCD в восстанавливающем канале, при этом, моды 1 и 2 находятся в фокальных плоскостях оптических объективов L; BD – интегрирующий детектор в объектном канале; C – коррелятор интенсивностей (схема совпадений)

Предложена схема формирования квантовых фантомных изображений с учётом поляризационных характеристик света. Анализ поляризационных характеристик мод 3 и 4 показал, что можно улучшить качество формирования квантовых фантомных изображений за счёт дополнительной информации об объекте исследования по сравнению с традиционным их формированием на основе корреляционной функций второго порядка [1]. Изучено влияние дифракции на пространственное разрешение фантомных изображений.

Список литературы

1. Белинский А.В., Сингх Р. // ЖЭТФ. 2021. Т. 159. № 2. С. 258-261.
2. Белинский А.В. // Журнал прикладной спектроскопии. 1989. Т. 50. № 3. С. 469-472.
3. Белинский А.В., Чиркин А.С. // Оптика и спектроскопия. 1988. Т. 65. № 4. С. 967-970.
4. Чиркин А.С. // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 103. № 4. С. 309-313.

С.М. ПОПОВ, О.В. БУТОВ¹, ЛИ СЯ², ЧЖОИН ВАН²,
Ю.К. ЧАМОРОВСКИЙ

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН*

¹*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва*

²*Хуачжунский университет науки и технологии, Ухань, Китай*

ТЕХНОЛОГИЯ ДЕМОДУЛЯЦИИ С РАСПРЕДЕЛЁННЫМ ЗОНДИРОВАНИЕМ С БОЛЬШОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТЬЮ НА ОСНОВЕ ПЛОТНОГО ИДЕНТИЧНОГО МАССИВА ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЁТОК

Приведены результаты эксперимента по созданию распределённой системы мониторинга растяжения оптического волокна (ОВ) на основе метода СВЧ демодуляции высокой пропускной способности. Чувствительный элемент системы – массив из 600 ВБР, записанных в процессе вытяжки ОВ. Достоинством метода является его высокое пространственное разрешение (менее 0,1 м) и точность (до 0.0001 %) при технической простоте.

S.M. POPOV, O.V. BUTOV¹, LI XIA², ZHUOYING WANG²,
Yu.K. CHAMOROVSKIY

Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS

¹*Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS, Moscow*

²*Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China*

DISTRIBUTED SENSING DEMODULATION TECHNOLOGY BASED ON DENSE IDENTICAL FBG ARRAY WITH LARGE MULTIPLEXING CAPACITY

The results of an experiment of creation of a distributed system for monitoring the stretching of an optical fiber (OF) based on the method of high-bandwidth microwave demodulation are shown. The sensitive element of the system is an array of 600 FBGs inscribed in the process of drawing OF. The advantage of the method is its high spatial resolution (less than 0.1 m) and accuracy (up to 0.0001 %) with technical simplicity.

Метод СВЧ демодуляции [1] находит своё применение в распределённых системах мониторинга натяжения оптического волокна (ОВ) и сочетает в себе простоту технической реализации, высокое пространственное разрешение (0.1 м) и высокую точность измерения

натяжения ОВ (до 0.0001 %). В работе показана возможность использования системы СВЧ демодуляции в сочетании с ОВ с массивом волоконных брэгговских решёток (ВБР) записанных в процессе вытяжки оптического волокна для систем мониторинга растяжения ОВ.

Экспериментальная установка показана на рис. 1. Широкополосный источник излучения (ASE) через контроллер поляризации (PC), электрооптический модулятор (EOM) и циркулятор (C) зондирует массив ВБР (AFBG). Обратный сигнал с циркулятора через полосовой фильтр (OBPF) попадает на фотодиод (PD) и фиксируется с помощью сетевого векторного анализатора (VNA). VNA синхронно изменяет частоту зондирующего сигнала в полосе до 2.5 ГГц за счёт его модуляции. Полученный частотный сигнал (спектр) с помощью обратного преобразования Фурье (iFFT) преобразуется во временное (пространственное) распределение (рефлектограмму). Массив ВБР длиной 6 метров состоит из 600 единичных ВБР записанных в процессе вытяжки ОВ типа SMF-28 [2, 3]. Интегральный коэффициент отражения массива ВБР достигает величины 6 % на длине волны 1548.2 нм с шириной 0.3 нм.

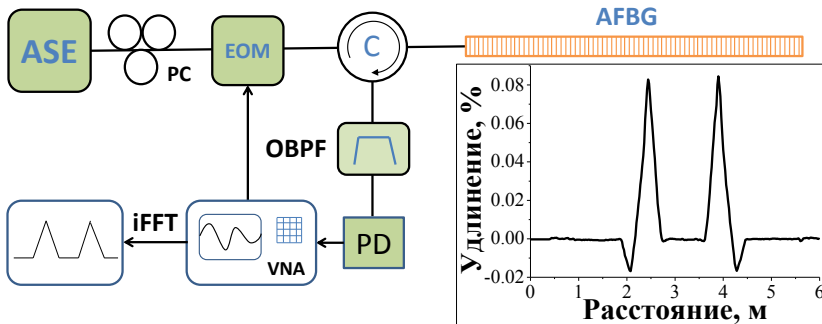


Рис. 1. Схема экспериментальной установки и полученные результаты (вставка)

В ходе эксперимента ОВ с массивом ВБР подвергался растяжению в двух местах за счёт пропускания ОВ через место растяжения два раза (петля). Экспериментальная рефлектограмма показана во вставке на рис. 1. Видна симметрия двух пиков для разных мест растяжения ОВ.

Работа выполнена в рамках государственного задания и при частичной поддержке гранта РФФИ и ГФЕН Китая № 20-57-53013.

Список литературы

1. Xia L., Cheng R., Li W., Liu D. // IEEE Photon. Tech. Lett. 2015. V. 27 (3). P. 323.
2. Popov S.M., Butov O.V., et. al. // Quantum Electronics. 2019. V. 49 (12). P. 1127.
3. Popov S.M., Butov O.V., et. al. // Quantum Electronics. 2021. V. 51 (12). P. 1101.

Н.И. САЛЬНИКОВ^{1,2}, В.В. ДОРОФЕЕВ^{1,3}, А.Ф. КОСОЛАПОВ⁴,
А.В. АНДРИАНОВ¹, Е.А. АНАШКИНА^{1,2}

¹*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород*

²*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского*

³*Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых РАН,
Нижний Новгород*

⁴*Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова ИОФ РАН, Москва*

ДИСПЕРСИОННЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННОГО ТЕЛЛУРИТНОГО ВОЛОКНА С СОХРАНЕНИЕМ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Выполнено численное моделирование дисперсионных и нелинейно-оптических характеристик разработанного и изготовленного микроструктурированного теллуритного волокна с сохранением поляризации. Показано, что при уменьшении размера сердцевины длина волны нулевой дисперсии смещается в коротковолновый диапазон.

N.I. SALNIKOV^{1,2}, V.V. DOROFEEV^{1,3}, A.F. KOSOLAPOV⁴,
A.V. ANDRIANOV¹, E.A. ANASHKINA^{1,2}

¹*Institute of Applied Physics of the RAS, Nizhny Novgorod*

²*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod*

³*Devyatykh Institute of Chemistry of High-Purity Substances of the RAS, Nizhny Novgorod*

⁴*Dianov Fiber Optics Research Center of Prokhorov General Physics Institute of the RAS,
Moscow*

DISPERSION AND NONLINEAR OPTICAL CHARACTERISTICS OF MICROSTRUCTURED TELLURITE POLARIZATION-MAINTAINING FIBER

We performed a numerical simulation of the dispersion and nonlinear optical characteristics of the developed and manufactured microstructured tellurite polarization-maintaining fiber. It is shown that with a decrease in the core size, the zero-dispersion wavelength shifts to the short-wavelength range.

Выполнена разработка новых микроструктурированных волокон с сохранением поляризации на основе теллуритных стёкол, прозрачных в диапазоне до 5.5 мкм. Технология изготовления стёкол описана в [1]. Волокна могут использоваться для транспортировки излучения и в качестве нелинейно-оптических преобразователей излучения из ближнего

в средний ИК-диапазон. Изготовлено волокно с 14 воздушными отверстиями вокруг несимметричной сердцевины (рис. 1а). Показано, что при линейном масштабировании размеров сердцевины с коэффициентом α можно эффективно управлять дисперсионными и нелинейными характеристиками. Моделирование выполнено методом конечных элементов. Используемая модель при $\alpha = 1$ показана на рис. 1б. Были найдены эффективные показатели преломления n_{eff} при различных α для фундаментальных мод с двумя поляризациями, а затем рассчитана дисперсия [2]: $\beta_2 = d^2[(\omega/c) \cdot \text{Re}(n_{\text{eff}})]/d\omega^2$, где ω – круговая частота, c – скорость света (рис. 1в). С уменьшением линейного размера длина волны нулевой дисперсии ZDW смещается в коротковолновый диапазон: ZDW составляет 2.01, 1.77 и 1.53 мкм при $\alpha = 1, 0.5$ и 0.3 соответственно. Также находились распределения полей мод и вычислялись нелинейные коэффициенты $\gamma = (\omega/c)[n_2 P_z d^2 r]/[P_z d^2 r]^2$, где P_z – продольная компонента вектора Пойнтинга, n_2 – нелинейный показатель преломления. Чем меньше сердцевина, тем больше γ (рис. 1з).

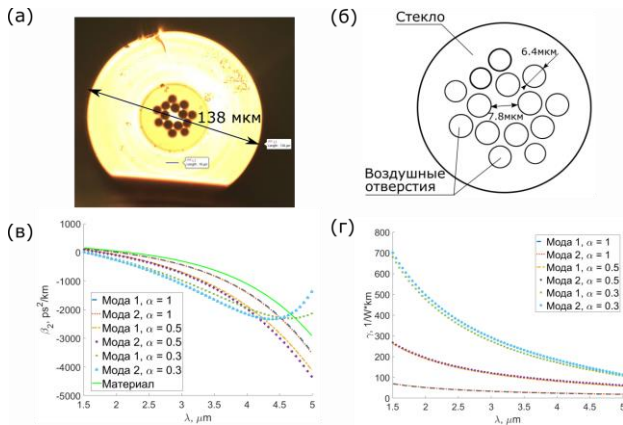


Рис. 1. Поперечное сечение изготовленного волокна, полученное с помощью оптического микроскопа (а), модель волокна, используемая в конечно-элементном моделировании (при $\alpha = 1$) (б), дисперсии групповых скоростей фундаментальных мод (в), нелинейные керровские коэффициенты (г)

Работа поддержана РФФИ (гранты 19-29-11032, 20-03-00874) и Министерством науки и высшего образования РФ (075-15-2021-633).

Список литературы

1. Moiseev A.N., et al. // Opt. Mater. 2011. V. 33 (12). P. 1858.
2. Agrawal G.P. Nonlinear Fiber Optics. 6th ed. Amsterdam: Elsevier, 2019.

Д.В. РЯХОВСКИЙ, С.М. ПОПОВ, В.А. ИСАЕВ,
А.О. КОЛОСОВСКИЙ, В.В. ВОЛОШИН,
И.Л. ВОРОБЬЁВ, Ю.К. ЧАМОРОВСКИЙ

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН*

ОПТИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ

Представлены результаты работ по созданию металлизированных микроструктурированных оптических волокон для применения в условиях высоких температур и эксплуатации в системах распределённого мониторинга. В докладе приведена фотография полученной структуры, показаны основные составляющие оптических потерь, как при нормальных условиях, так и при температурах до 450 °С.

D.V. RYANOVSKIY, S.M. POPOV, V.A. ISAEV, A.O. KOLOSOVSKIY,
V.V. VOLOSHIN, I.L. VOROB'EV, Yu.K. CHAMOROVSKIY

Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS

OPTICAL LOSS OF METAL COATED MICROSTRUCTURED OPTICAL FIBERS

The results of work on the creation of metallized microstructured optical fibers for use at high temperatures in distributed monitoring systems are presented. The report contains a photograph of the resulting structure, showing the main components of optical losses, both under normal conditions and at temperatures up to 450 °C.

Хорошо известно, что телекоммуникационные оптические волокна (ОВ) могут работать лишь при температурах до 85 °С из-за деградации покрытия при повышенных температурах, что крайне критично при их использовании в волоконных датчиках температуры (до 1000 °С). Ранее было предложено использовать металлические покрытия ОВ на основе меди, алюминия и сплавов на их основе [1 - 4]. Это позволило расширить диапазон рабочих температур ОВ до 700 °С. Основные факторы влияющим на потери металлизированных ОВ – это поглощение на гидроксильных ионах (1.24 и 1.39 мкм) и потери на микроизгибах ОВ из-за разности ЛКТР металлического покрытия и кварцевого стекла ОВ. В работе [5] нами было предложено использовать в качестве волноводной структуры микроструктурированное ОВ с так называемой «подвешенной»

сердцевиной. Это впервые позволило получить металлизированные ОВ диаметром 125 мкм с приемлемым уровнем потерь 5 и 4 дБ/км на длинах волн 1.31 и 1.55 мкм, соответственно. При термоциклировании в области температур 20...450 °С прирост потерь составил величину около 2.5 - 3 дБ в области длин волн 1.31 и 1.55 мкм. Прирост потерь на гидроксильных ионах – более 120 дБ/км на $\lambda = 1.39$ мкм. На рис. 1 показана фотография оптимизированной структуры ОВ диаметром 125 мкм с так называемой «подвешенной» сердцевиной (размеры сердцевины – 4.8 мкм), изготовленного из синтетического кварца типа Heraeus F-300. На рис. 2. показана спектральная зависимость потерь (1.31 мкм – 6 дБ/км и 1.55 мкм – 3.3 дБ/км). Потери на длине волны 1.39 мкм более 200 дБ/км (оценка по поглощению на длине волны 1.24 мкм как 9 дБ/км x 23 раза). Изменение оптических потерь при термоциклировании в области температур 20...450 °С – менее 1 дБ/км на длинах волн 1.31 и 1.55 мкм, что значительно меньше ранее полученных результатов.



Рис. 1. Фотография микроструктурированного ОВ с синтетической сердцевиной

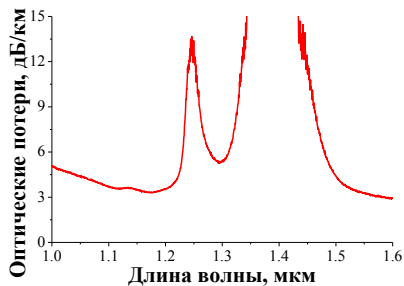


Рис. 2. Оптические потери микроструктурированного ОВ при нормальных условиях

По мнению авторов, данная структура ОВ перспективна для создания металлизированных ОВ для работы при высоких температурах, но всё ещё требует оптимизации уровня потерь на гидроксильных ионах.

Работа выполнена в рамках государственного задания.

Список литературы

1. Voloshin V.V., Vorob'ev I.L., et. al. // Tech. Phys. Lett. 2009. V. 35 (4). P. 365.
2. Voloshin V.V., Vorob'ev I.L., et. al. // Jour. of Comm. Tech. and Elec. 2011. V. 56 (4). P. 90.
3. Popov S.M., Voloshin V.V., et. al. // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2012. V. 21 (1). P. 45.
4. Chamarovskiy Yu.K., Butov O.V., et. al. // Optical Fiber Technology. 2017. V. 34. P. 30.
5. Попов С.М., Ряховский Д.В. // Фотон-экспресс. 2021. Т. 174 (6). С. 65.

Д.Г. ГИЛЕВ^{1,3}, В.В. КРИШТОП^{1,2,3}

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет

³Пермская научно-производственная приборостроительная компания

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ НАВЕДЁННОГО ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЯ ОТ РАДИУСА ИЗГИБА ПО ПОЛОЖЕНИЮ БОКОВЫХ РЕЗОНАНСНЫХ ПИКОВ

Экспериментально определена зависимость наведённого двулучепреломления одномодового оптического волокна, применяемого в резонансном контуре от радиуса изгиба. Двулучепреломление найдено по разнице между частотами основного и вторичного резонансного пика в кольцевом резонаторе. Показано, что полученная экспериментальная зависимость сходится с теоретическими оценками.

D.G. GILEV^{1,3}, V.V. KRISHTOP^{1,2,3}

¹Perm State University

²Perm National Research Polytechnic University

³Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company

DETERMINATION OF THE DEPENDENCE OF THE INDUCED BIREFRINGENCE ON THE BENDING RADIUS BY THE POSITION OF SIDE RESONANT PEAKS

The dependence of the induced birefringence of a single-mode optical fiber used in the resonator on the bend radius is experimentally determined. Birefringence was found from the difference between the frequencies of the main and side resonance peaks in a ring resonator. It is shown that the obtained experimental dependence is in agreement with theoretical estimates.

Оптические кольцевые резонаторы (ОКР) представляют собой интерферометрическую схему, которая состоит из прямого волноводного канала, области связи и замкнутого оптического контура. Они находят следующие применения: для стабилизации частоты излучения в лазерной технике [1], в качестве оптоэлектронного генератора частоты [2] и т.д. В том числе, оптический резонатор может являться чувствительным элементом миниатюрного резонансного гироскопа [3].

Спектр волоконно-оптического кольцевого резонатора (ВОКР) включает в себя набор резонансных пиков (или вырезов) одинаковой амплитуды, наблюдающихся в частотном диапазоне. При скручивании

оптического контура в петлю обнаружено, что рядом с основными пиками появляются «вторичные» резонансные пики.

Эффект наведения двулучепреломления и возникновения двух резонансных пиков рассматривается в работе [4, 5]. В работе [5] построена простая математическая модель, которая учитывает количественно значение индуцированного двулучепреломления от радиуса изгиба R [6]: $\Delta n = -0,13(R_f/R)^2$. Для экспериментального определения Δn по разнице частот между основными и боковыми пиками Δf_p при различном значении наведённого двулучепреломления Δn авторами выведено выражение: $\Delta n = -\Delta f_p n_{\text{eff}} / f_0$.

Для построения экспериментальной зависимости был изготовлен ВОКР из волоконно-оптического разветвителя с коэффициентом деления 90 : 10 и длиной контура 1,4 м и различным радиусами от 22,5 до 2,5 см. Спектр ВОКР снимался методом линейной перестройки узкополосного лазера [7]. На полученном спектре измерялось расстояние Δf_p (рис. 1) для каждого из радиусов. Для каждого значения Δf_p вычислено значение Δn и построена экспериментальная зависимость от R изгиба волокна в контуре (рис. 2). Также построена аппроксимационная кривая, которая сходится с теоретической зависимостью R^{-2} : $\Delta n = 6,15 \cdot 10^{-10}/R^2 + 1,68 \cdot 10^{-7}$.

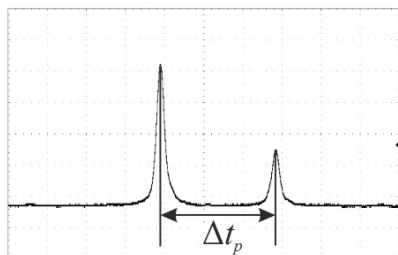


Рис. 1. Часть спектра резонатора с основным и боковым резонансным пиком

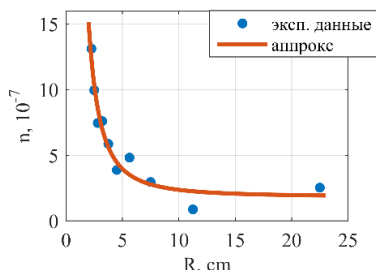


Рис. 2. Экспериментальная зависимость двулучепреломления от радиуса изгиба

Список литературы

1. Geng J., et al. // Optics Communications. 2021. P. 127531.
2. Saleh K., et al. // 2012 IEEE International Frequency Control Symposium Proceedings. IEEE, 2012. P. 1-6.
3. Гилев Д.Г. и др. // Оптический журнал. 2022. № 1.
4. Hotate K., et al. Eigenstate of polarization in a fiber ring resonator and its effect in an optical passive ring-resonator gyro // Applied Optics. 1986. V. 25. No. 15. P. 2606-2612.
5. Валушина П.М., Гилев Д.Г. // Фотон-экспресс. 2021. № 6 (174). С. 367-369.
6. Feng T., et al. // Optics Express. 2018. V. 26. No. 20. P. 25989-26002.
7. Валушина П.М., Овчинников К.А., Гилев Д.Г. // Прикладная фотоника. 2021. № 2.

Д.П. СУДАС, Е.А. САВЕЛЬЕВ, Г.Г. ЯКУЩЕВА, П.И. КУЗНЕЦОВ
*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН*

ОПТОВОЛОКОННЫЙ РЕФРАКТОМЕТР С ПОКРЫТИЕМ ИЗ ДИОКСИДА ОЛОВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ КИСЛОТ

Изготовлен оптоволоконный датчик для химически агрессивных сред, таких как концентрированные водные растворы кислот (HCl , HNO_3 , H_2SO_4). Датчик основан на оптическом волокне с секцией, подвергнутой химическому утонению оболочки, покрытой тонкой плёнкой диоксида олова (SnO_2) методом химического парофазного осаждения из металлоорганических соединений (MOCVD). Высокая химическая стойкость покрытия подтверждена его устойчивостью к воздействию царской водки (AR). Чувствительность датчика к изменению показателя преломления окружающей среды (SMRI) составляла более 5260 нм/единицу показателя преломления (ЕПП).

D.P. SUDAS, E.A. SAVELYEV, G.G. YAKUSCSHEVA,
P.I. KUZNETSOV

Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS

OPTICAL FIBER REFRACTOMETER COATED WITH TIN DIOXIDE FOR MEASURING THE PARAMETERS OF CONCENTRATED ACIDS

A fiber-optic sensor for chemically aggressive environments, such as concentrated solutions of acids (HCl , HNO_3 , H_2SO_4), has been manufactured. The sensor is based on an optical fiber with a chemically thinned section coated with a thin film of tin dioxide (SnO_2) by metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD). The high chemical resistance of the coating is confirmed by its resistance to the influence to aqua regia (AR). The sensitivity of the sensor to changes in the surrounding media refractive index (SMRI) was more than 5260 nm/RIU.

Небольшая часть излучения, переносимого оптическим волокном, находится в непосредственной близости у внешней границы сердцевины и формирует затухающее поле моды в области оболочки [1]. Благодаря этому возможно взаимодействие окружающей среды с модой световода, которое можно усилить с помощью различных методов изменения сечения волокна на ограниченной длине. Один из таких подходов заключается в

химическом утонении оболочки волокна. Благодаря этому возможно наблюдение таких эффектов как поверхностный плазмонный резонанс (SPR) [2] или резонанс затухающей моды (LMR) [3]. Последний может быть реализован при использовании в качестве покрытия волоконного световода большого спектра полупроводников и полимеров и выглядит как провал в спектре пропускания световода. Положение этого провала зависит от показателя преломления внешней среды. Используя химически стойкое соединение диоксида олова, мы демонстрируем возможность измерения показателя преломления концентрированных растворов кислот.

В качестве основы для создания сенсоров мы использовали одномодовое волокно SMF-28 с диаметром сердцевины 8,2 мкм. Покрытие наносилось методом MOCVD. После осаждения оптическое волокно с утонённой областью встраивалось в схему измерения оптического пропускания. Предварительное тестирование на химическую стойкость проводилось при выдерживании сенсора в царской водке в течение пяти минут (рис. 1). Зависимость положения LMR от показателя преломления кислот показана на рис. 2. Чувствительность изготовленного сенсора в диапазоне показателей преломления раствора от 1,375 до 1,41 составила 5260 ± 25 нм/ЕПП.

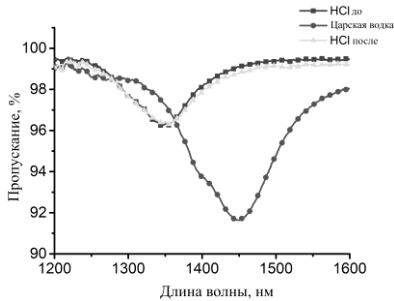


Рис. 1. Спектр пропускания сенсора при тестировании в царской водке

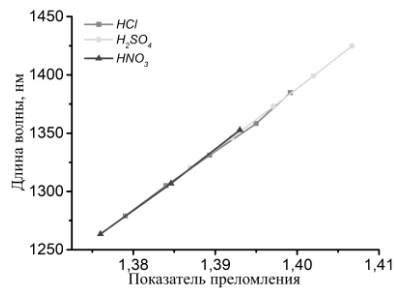


Рис. 2. Зависимость положения резонанса от показателя преломления раствора

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда проект № 21-19-00259.

Список литературы

1. Henry W.M. // Proc. SPIE 1994. V. 2293.
2. Sharma A.K. // Fiber Optic Sensors: Current Status and Future Possibilities. Switzerland: Springer International Publishing. 2017. V. 21. P. 51-67.
3. Paliwal N., John J. // IEEE Sensors Journal, 2015. V. 15. No. 10. P. 5361-5371.

А.В. ПАРОЧКИН, А.А. БУШУНОВ

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

ПРОСВЕТЛЯЮЩИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ НА ЛАЗЕРНЫХ ВОЛНОВОДАХ

Созданы просветляющие микроструктуры на торцах кристалла $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ с помощью фемтосекундного лазера. Они позволяют снизить потери на френелевское отражение в диапазоне 2 - 3 мкм до 10 %, что в дальнейшем будет использовано для увеличения КПД волноводного лазера на $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$.

A.V. PAROCHKIN, A.A. BUSHUNOV

Bauman Moscow State Technical University

ANTIREFLECTION MICROSTRUCTURES ON DEPRESSED CLADDING BURIED WAVEGUIDE LASERS

We report antireflection sub-wavelength structures to be fabricated with a femtosecond laser on a $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ crystal. These reduce Fresnel's losses down to 10 % in the 2 - 3 μm waveband. This technology will help us increase the efficiency for $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ depressed cladding buried waveguide lasers.

В настоящее время является актуальным использование ИК-лазеров в диапазоне 2 - 3 мкм на космических аппаратах и в медицине. В связи с этим требуется миниатюризация приборов на основе таких лазеров. Компактные лазеры с высокой выходной мощностью в среднем ИК создаются на кристаллах с волноводами-резонаторами [1].

В данном исследовании рассматриваются кристаллы $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ со сформированными в них волноводами. У лазеров на основе данных активных сред одним из ограничивающих КПД факторов является френелевское отражение. Из-за высокого показателя преломления ($n = 2,3$ для $\lambda = 2$ мкм) эти потери за один проход составляют 15,5 %. Для их устранения обычно применяются просветляющие плёнки. Такие покрытия работают в узком диапазоне длин волн и плохо подходят для использования в лазерах с широким диапазоном перестройки. Кроме того, под действием нагрева материалы плёнки и основы расширяются по-разному, что приводит к появлению трещин. Также просветляющие покрытия в ИК-диапазоне должны иметь значительную толщину, что создаёт дополнительные технологические трудности [2, 3].

Этих недостатков лишены просветляющие микроструктуры, которые представляют собой периодический рельеф на поверхности материала. С

точки зрения теории эффективной среды, такая структура представляет собой слой основного материала, содержащий вкрапления воздуха, поэтому его показатель преломления (ПП) ниже, чем у основы. Если рельеф имеет вид заострённых выступов (или воронок), то ПП плавно изменяется от их вершин к основаниям [4]. Это позволяет добиться увеличения пропускания до 100 % в диапазоне более широком, чем рабочий диапазон просветляющих плёнок [2]. Микроструктуры на торцах кристалла $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ создаются фемтосекундным лазером Yt:KGW ($E_{\text{им}} = 1,6$ нДж, 513 нм, 200 фс). Для этого импульсы фокусируются объективом ($N_A = 0,5 \cdot 100\times$) на расстоянии 4 мкм под поверхностью кристалла. Пропускание готовой структуры измеряется на спектрометре.

Для определения оптимальных параметров работы лазера были созданы пробные структуры на поверхности кристалла $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ без волновода при различных режимах. Среди рассмотренных вариантов был выбран обеспечивающий наиболее высокое пропускание в диапазоне 2 - 3 мкм (рис. 1), его и использовали для кристалла с волноводом.

По снимку образца на СЭМ (рис. 2) можно оценить форму и качество структуры. В данном случае период равен 0,8 мкм. Глубина составляет 0,4 мкм, вследствие чего пропускание не достигает единицы. Исследования показывают, что эта же установка позволяет достичь большего пропускания при работе с другими материалами [3]. После обработки кристалла $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ пропускание в диапазоне 2 - 3 мкм увеличилось на 5 %. Чтобы повысить его до 100 %, надо увеличить глубину структуры, для чего планируется использование пучка Бесселя.

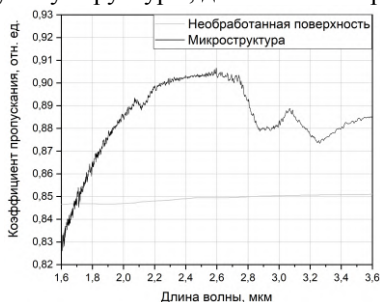


Рис. 1. Спектр пропускания

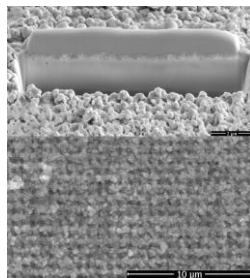


Рис. 2. Фотография поверхности

Список литературы

1. Tolstik N.A., et al. // CLEO: Science and Innovations. 2019. P. STh1E.6.
2. Chattopadhyay S., et al. // Materials Science and Engineering: Reports. 2010. V. 69. P. 1-35.
3. Bushunov A.A., et al. // Laser and Photonics Reviews. 2021. V. 15. No. 5. P. 2000202.
4. Choy T.C. Effective medium theory: principles and applications. Oxford Univer. Press, 2015.

Л.Н. БОРОДИНА, В.Н. БОРИСОВ, К.И. АННАС,
А.Ю. ДУБОВИК, А.В. ВЕНИАМИНОВ, А.О. ОРЛОВА
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ЛАЗЕРНАЯ МИКРОСКОПИЯ ФОТОИНДУЦИРОВАННЫХ СТРУКТУР ИЗ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК

В работе представлены результаты исследования фотоиндуцированного пространственного перераспределения квантовых точек в жидком фотополимере при голографической записи и записи сфокусированным лазерным пучком. Средствами конфокальной лазерной сканирующей микроскопии исследована динамика изменений локальных люминесцентных свойств материала.

L.N. BORODINA, V.N. BORISOV, K.I. ANNAS,
A.Yu. DUBAVIK, A.V. VENIAMINOV, A.O. ORLOVA
ITMO University, Saint-Petersburg

LASER MICROSCOPY OF PHOTOINDUCED STRUCTURES OF QUANTUM DOTS

The results of the study on the photoinduced spatial redistribution of quantum dots in a liquid photopolymer in the course of holographic recording and writing by a focused laser beam are presented. By means of confocal laser scanning microscopy, the dynamics of local changes in the luminescent properties of the material were investigated.

Использование полупроводниковых коллоидных квантовых точек (КТ) в качестве нейтральной компоненты в жидких фотополимерных светочувствительных средах для голографии представляет особый интерес благодаря показателю преломления КТ, значительно превосходящему показателю преломления мономеров и полимеров, и их выдающимся люминесцентным свойствам. Формирование голограммы в таких композитных материалах основано на взаимодействии мономера и наночастиц в процессе фотополимеризации [1]. Записанные объёмные решётки обладают высокой модуляцией показателя преломления, стабильностью, и могут служить основой для систем с распределённой обратной связью [2].

Исследование как голограмм с КТ, так и самого светочувствительного материала выполнено средствами лазерной сканирующей микроскопии, которая даёт возможность строить объёмные изображения голограмм,

измерять локальные спектры люминесценции и изучать диффузию КТ посредством формирования пространственной неоднородности их люминесценции и наблюдения за профилем её интенсивности [3].

Микроизображения участка записанной голограммы с КТ как люминесцентное (рис. 1а), так и в проходящем свете (рис. 1б), свидетельствуют о перераспределении КТ в пространстве и их концентрировании в узких полосах. Сканирование по трём координатам позволяет визуализировать объёмное распределение нанокристаллов в голограмме (рис. 1в) и оценить толщину периодической структуры.

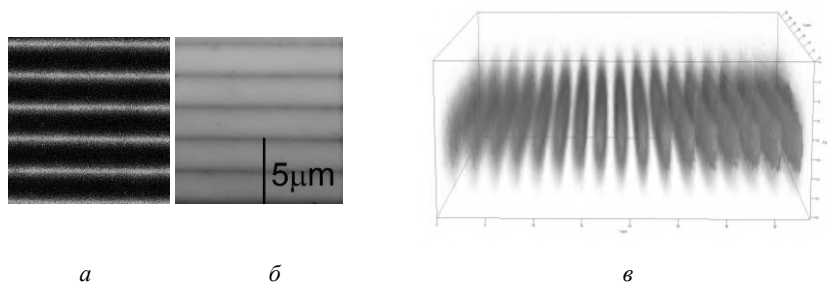


Рис. 1. Изображения микроскопического участка голограммы: люминесцентное (а), в проходящем свете (б) и «объёмное», синтезированное по данным трёхмерного сканирования (в), полученные с помощью лазерного сканирующего микроскопа LSM 710 (Zeiss) с лазером, излучающим на длине волны 405 нм

Кинетика затухания люминесценции КТ в голограмме, а также скорость трансформации профиля распределения КТ, отвечающая их размерам, указывают на отсутствие агрегации КТ при формировании голограммы.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта НИРМА ФТ МФ Университета ИТМО (Л.Б.) и Минобрнауки РФ, госзадание № 2019-1080.

Список литературы

1. Tomita Y., et al. Photopolymerizable nanocomposite photonic materials and their holographic applications in light and neutron optics // Journal of Modern Optics. 2016. V. 63. No. 3. P. 1-31.
2. Smirnova T.N., Sakhno O.V., Yezhov P.V., Kokhtych L.M., Goldenberg L.M., Stumpe J. Amplified spontaneous emission in polymer – CdSe/ZnS-nanocrystal DFB structures produced by the holographic method // Nanotechnology. 2009. V. 20. P. 245707.
3. Lorén N., Hagman J., Jonasson J.K., et al. Fluorescence recovery after photobleaching in material and life sciences: putting theory into practice // Quarterly Reviews of Biophysics. 2015. V. 48. No. 3. P. 323-387.

А.Н. МЕЛЬНИКОВ

АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики», Казань

НОВЫЙ ПОДХОД В ЗАДАЧЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ТОРОИДАЛЬНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЁТОК

Предложены усовершенствованные принципы построения делительной машины маятникового типа, открывающие возможности изготовления светосильных тороидальных дифракционных решёток.

A.N. MELNIKOV

Scientific and Production Association «State Institute of Applied Optics», Kazan

A NEW APPROACH TO THE PROBLEM OF FABRICATION OF TOROIDAL DIFFRACTION GRATINGS

The paper proposes improved principles for constructing a pendulum-type ruling engine, which open up the possibility of manufacturing high-aperture toroidal diffraction gratings.

Известно, что одним из эффективных методов компенсации астигматизма в оптических схемах спектральных приборов является применение в них неклассических вогнутых тороидальных дифракционных решёток (ДР) [1, 2]. Каталоги передовых фирм-изготовителей дифракционной оптики содержат коммерчески доступные тороидальные ДР, например [3, 4]. Однако их номенклатура ограничена по габаритам, светосиле и соотношению между собой радиусов кривизны в меридиональном и сагиттальном сечениях (МСС), что связано с ограниченными возможностями современного технологического оборудования, в частности классических делительных машин (ДМ), построенных по кинематической схеме Роуленда [5].

Для решения актуальной задачи увеличения номенклатуры светосильных тороидальных ДР предлагается использовать ДМ маятникового типа [6 - 9] с учётом введения следующих основных усовершенствований в принципы её построения: а) необходимость обеспечения перекрещивания между собой осей поворота резцовой (РК) и делительной (ДК) кареток; б) необходимость обеспечения значений размерных цепей конструктивных параметров РК и ДК в соответствии со значениями радиусов кривизны в МСС тороидальной ДР.

Используя алгоритм получения аналитических выражений [9], выведены следующие соотношения для описания геометрических параметров криволинейных проекций штрихов вогнутой тороидальной ДР (рассматривается плоскость Oyz , касательная к вершине вогнутой тороидальной ДР): 1) уравнение проекций штрихов

$$\frac{(y - (R_m - R_s) \sin \varphi)^2}{(R_s \sin \varphi)^2} + \frac{z^2}{R_s^2} = 1, \quad (1)$$

где R_m и R_s – радиусы кривизны в МСС соответственно (причём $R_m > R_s$), φ – постоянный угловой шаг штрихов на тороидальной поверхности ДР;

2) радиус кривизны ρ_i ближайшей вершинной окружности для криволинейной проекции штриха в зависимости от координаты y_i

$$\rho_i = R_m R_s / y_i, \quad (2)$$

3) переменный шаг e_{pri} криволинейных проекций штрихов

$$e_{pri} = e_0 \left(1 - \left(y_i / R_m \right)^2 \right)^{1/2} \cong e_0 \left(1 - \frac{1}{2} \left(y_i / R_m \right)^2 \right), \quad (3)$$

где e_0 – значение начального периода проекций штрихов.

Полученные выражения (1) – (3) могут быть использованы для оптимизации коэффициентов аберраций 1 – 3-го порядков светосильных тороидальных ДР.

Список литературы

1. Пейсахсон И.В. Оптика спектральных приборов. Л.: Машиностроение, 1975.
2. Павлычева Н.К. Спектральные приборы с неклассическими дифракционными решётками. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2003.
3. Холдинг АО «Швабе» АО «НПО ГИПО». Каталог оптической компонентной базы. URL: <http://shvabe.com/about/company/gosudarstvennyy-institut-prikladnoy-optiki/produksiya-gipo/opticheskie-materialy>.
4. Корпорация «HORIBA Jobin Yvon Ltd.». URL: <http://www.horiba.com/scientific/products/diffraction-gratings/>.
5. Герасимов Ф.М., Яковлев Э.А. Дифракционные решётки. Современные тенденции в технике спектроскопии. Новосибирск: Наука, 1982. С. 24-94.
6. Лукин А.В., Мельников А.Н. Делительная машина маятникового типа для изготовления штриховых структур на неплоских рабочих поверхностях. Патент РФ на изобретение № 2691821. 2019.
7. Мельников А.Н. Технологии формообразования светосильных дифракционных оптических элементов на основе использования делительной техники маятникового типа // Фотоника. 2019. Т. 13. № 5. С. 468-475.
8. Мельников А.Н. Делительная машина маятникового типа для изготовления штриховых структур на вогнутых поверхностях. Патент РФ на изобретение № 2725324. 2020.
9. Бажанов Ю.В., Лукин А.В., Мельников А.Н. Новые возможности получения неклассических нарезных дифракционных решёток большой апертуры // Оптический журнал. 2021. Т. 88. № 9. С. 44-51.

Д.Г. ДЕНИСОВ, В.Е. КАРАСИК, В.В. АЗАРОВА^{1,2}

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

¹*Научно-исследовательский институт «Полус» им. М.Ф. Стельмаха, Москва*

²*Московский физико-технический институт*

(национальный исследовательский университет), Долгопрудный

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЦЕССОВ РАССЕЯНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ШЛИФОВАННЫХ И ПОЛИРОВАННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Рассматриваются методы и аппаратура контроля параметров шероховатостей профилей оптических поверхностей, имеющих различный уровень среднего квадратичного отклонения (СКО) на различных стадиях технологической обработки. Разработаны и научно обоснованы метода Кирхгофа при рассеянии плоской электромагнитной волны фазовым экраном, а так же методы динамической интерферометрии и дифференциального рассеяния, основанные на теоретических положениях метода малых возмущений для задач высокоточного контроля параметров шероховатости и качества профилей оптических деталей.

D.G. DENISOV, V.E. KARASSIK, V.V. AZAROVA^{1,2}

Bauman Moscow State Technical University

¹*POLYUS Research Institute of M.F. Stelmakh Joint Stock Company, Moscow*

²*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny*

THE STUDY OF SPECIFIC FEATURES OF SCATTERING OF LASER RADIATION ON GRINDED AND POLISHED OPTICAL SURFACES

Methods and equipment for monitoring the roughness parameters of optical surfaces with different levels of mean square deviation (RMSD) at different stages of processing are considered. Developed and scientifically substantiated are the Kirchhoff methods for scattering a plane electromagnetic wave by a phase screen, as well as methods of dynamic interferometry and differential scattering, based on the theoretical principles of the method of small perturbations for the problems of high-precision control of the roughness parameters and the quality of profiles of optical parts..

Для создания и успешного внедрения в России отечественных оптико-электронных приборов технологического контроля необходимо иметь не только современную технологию производства крупногабаритных оптических изделий нового поколения, но и перспективные методики

диагностики их статистических показателей качества на базе комплексного подхода [1, 2].

Для диагностики параметров шероховатости шлифованных оптических поверхностей разработан метод лазерной ИК-интерферометрии [1], успешно апробированный в производственных условиях как для контроля формы оптической шлифованной поверхности [1, 2], так и для определения величины СКО [1, 2] высот микронеровностей [1] контролируемой шлифованной поверхности. Определение зависимости между параметрами шероховатой поверхности и параметрами отражённого электромагнитного поля, формируемого в результате дифракции волн на неровностях шероховатой поверхности в процессе интерферометрического контроля [1, 2], является основной задачей теории рассеяния излучения шероховатой поверхностью [1, 2]. При этом главным критерием степени шероховатости рассеивающей поверхности является соотношение между длиной волны падающего излучения и СКО высот микронеровностей [1, 2]. Для реализации высокоточного метода контроля параметров шероховатости нанометрового уровня в настоящей работе рассмотрен лабораторный измерительный стенд на базе динамического интерферометра с диаметром выходного зрачка 100 мм. Предложенный метод основан на частотном анализе профиля контролируемой детали в заданном диапазоне масштабов локальных неоднородностей, совокупность которых описывает структуру её исследуемой поверхности [1]. Для локального высокоточного контроля как поверхностных неоднородностей субнанометрового уровня, так и трещиноватого слоя предложено применять приближения метода малых возмущений. В этом случае геометрия задачи дифракции (рассеяния) сводится к рассеянию плоской электромагнитной монохроматической волны на оптической поверхности со статистическими высотными показателями профиля и флуктуациями диэлектрической проницаемости [1, 2].

Список литературы:

1. Денисов Д.Г. Измерение параметров шероховатостей шлифованных и полированных оптических поверхностей с помощью высокоточных методов лазерной интерферометрии // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 4. С. 393-411.
2. Денисов Д.Г., Азарова В.В. Анализ погрешностей метода контроля параметров шероховатости субнанометрового уровня поверхностей оптических деталей на основе измерения рассеянного лазерного излучения // Контентант. 2020. Т. 19. № 1. С. 8-14.

Н.А. УС, А.А. АВЕРШИН, М.В. МУРАВЛЕВ

*Военный учебный научный центр ВВС «Военно-воздушная академия
им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж*

ОПТИЧЕСКОЕ ПОКРЫТИЕ ДЛЯ ВНЕШНЕГО РЕЗОНАТОРА-РАСЩЕПИТЕЛЯ

В статье рассматривается один из основных элементов кольцевого моноблочного гироскопа с лазерным диодом – внешний резонатор-расщепитель оригинальной конструкции. Проанализирован спектральный портрет нескольких металлов используемых для нанесения светоотражающих покрытий на поверхности оптических узлов лазерных гироскопов. Представлен макетный образец внешнего резонатора-расщепителя с нанесённым алюминиевым светоотражающим покрытием.

N.A. US, A.A. AVERSHIN, M.V. MURAVLEV

*Military Training and Research Center of the Air Force Academy
named after professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin, Voronezh*

OPTICAL COVERING FOR THE EXTERNAL RESONATOR SPLITTER

In article one of basic elements of a ring monoblock gyroscope with the laser diode the external resonator splitter of an original design is considered. The spectral portrait of several metals of the reflecting coverings used for drawing on a surface of optical knots of laser gyroscopes is analyzed. The model sample of the external resonator splitter with the put aluminum reflecting covering is presented.

При изготовлении кольцевых лазерных гироскопов используются различные конструкционные материалы. Свойства материалов влияют на точность, надёжность, долговечность и обеспечивают правильное функционирование кольцевых лазерных гироскопов.

В исследовании рассматривается один из основных элементов кольцевого моноблочного гироскопа с лазерным диодом – внешний резонатор-расщепитель оригинальной конструкции «усечённая призма», позволяющий реализовать эффект Саньяка. Конструкция выполнена из оптического стекла К-8, а в качестве источника излучения используется микро мощный полупроводниковый лазерный диод LFO-525 [1].

Одним из основных недостатков внешнего резонатора-расщепителя являются высокие потери при прохождении лазерного излучения внутри

«усечённой призмы». Для уменьшения потерь и увеличения эффективности резонатора-расщепителя предлагается нанести металлизированное светоотражающее покрытие на грани конструкции, что позволит создать эффект объёмного резонирования [2].

Для выбора металлизированного светоотражающего покрытия в ходе моделирования использовались несколько металлов: хром (Cr), золото (Au), серебро (Ag) и алюминий (Al). Полученный спектральный портрет показал, что оптимально использовать алюминиевое покрытие (Al). Для подтверждения результатов моделирования был изготовлен макетный образец с алюминиевым покрытием, нанесённый методом электронно-вакуумного напыления. Окна прозрачности изготовлены методом лазерной гравировки (рис.) [3].

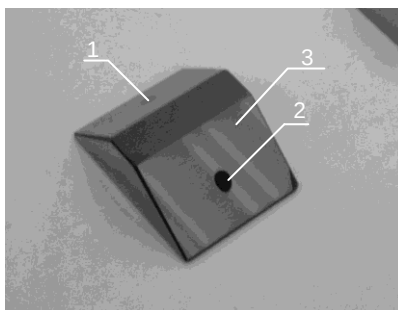


Рис. 1. Макетный образец внешнего резонатора-расщепителя:

1, 2 – окна прозрачности, 3 – металлизированное светоотражающее покрытие

Снижение потерь внутри конструкции макетного образца внешнего резонатора-расщепителя с алюминиевым покрытием при проведении эксперимента составило не менее 20 %.

Список литературы

1. Ус Н.А. Лазерный гироскоп. Патент РФ 2488773. МПК G01N. Заявл. 01.07.2011; опубл. 27.07.2013, Бюл. № 21.
2. Ус Н.А., Задорожний С.П., Авершин А.А. Расчёт математической модели формирователя двунаправленного излучения полупроводникового лазерного диода кольцевого лазерного гироскопа // Свидетельство для ЭВМ № 2017615128/69. Заявл. 25.05.17; опубл. 20.07.17.
3. Разработка кольцевого моноблочного гироскопа с полупроводниковым источником лазерного излучения КМГ. Отчет о НИР (промежуточный):13-21.ОАО «ЭЛАРА». 2015.

В.В. АЗАРОВА^{1,2}, П.И. ИЩЕНКО¹, А.В. КУЛАГИН¹,
М.С. ОГЛОБЛИН¹, В.В. ФОКИН¹, И.В. ЧЕРТОВИЧ¹

¹Научно-исследовательский институт «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха, Москва

²Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет), Долгопрудный

ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКООТРАЖАЮЩИХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ЗЕРКАЛ

Изложены требования к параметрам прецизионных зеркал, применяемых в лазерном приборостроении, в частности, в лазерной интерферометрии и гироскопии. Обсуждаются технологии получения прецизионных оптических поверхностей подложек с субнанометровой шероховатостью и методы их контроля. Рассматривается способ нанесения интерференционных покрытий, с помощью которого удовлетворяются требования минимального рассеяния, в частности, рассеяния в моду резонатора и фазовой анизотропии зеркал. Анализируются способы уменьшения поглощения в многослойных тонкоплёночных интерференционных покрытиях зеркал и метрологические особенности измерения поглощения.

V.V. AZAROVA^{1,2}, P.I. ISHCENKO¹, A.V. KULAGIN¹,
M.S. OGLOBLIN¹, V.V. FOKIN¹, I.V. CHERTOVICH¹

¹POLYUS Research Institute of M.F. Stelmakh Joint Stock Company, Moscow

²Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

FEATURES OF OBTAINING HIGHLY REFLECTIVE INTERFERENCE LASER MIRRORS

The requirements for the parameters of precision mirrors used in laser instrumentation, in particular, in laser interferometry and gyroscope, are described. Technologies for obtaining precision optical surfaces of substrates with sub nanometer roughness and methods for their control are discussed. A method of applying interference coatings is considered, which satisfies the requirements of minimal scattering, in particular, scattering into the resonator mode and the phase anisotropy of mirrors. The methods of reducing absorption in multilayer thin-film interference coatings of mirrors and metrological features of absorption measurement are analyzed.

Требования, предъявляемые к параметрам прецизионных зеркал, применяемых в лазерном приборостроении, в частности, в лазерной интерферометрии и гироскопии очень высокие [1, 2]. Проведён сравнительный анализ и обоснован выбор оптимальных технологических

процессов обработки поверхностей для применений в оптике. Как пример подтверждения зависимости качества лазерных зеркал по параметру интегральное рассеяние от шероховатости поверхностей подложек на рис. 1 приведены результаты статистического анализа параметров зеркал, полученные до (рис. 1а) и после (рис. 1б) выбора оптимального метода и усовершенствования технологических процессов изготовления подложек лазерных зеркал. Из рис. 1 видно, что усовершенствование технологии изготовления подложек привело к уменьшению величины рассеяния излучения на зеркалах более чем на порядок.

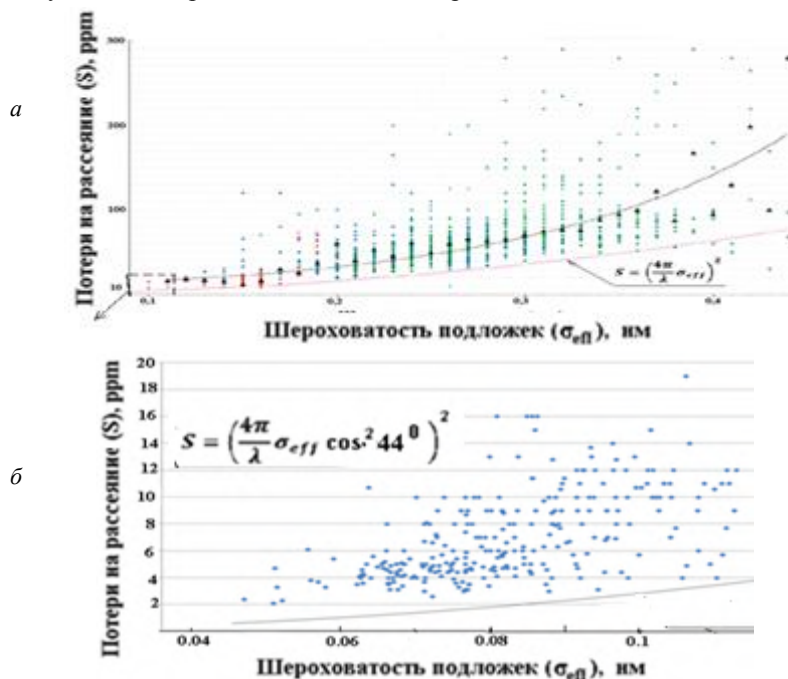


Рис. 1. Статистический анализ качества лазерных зеркал до (а) и после (б) усовершенствования технологических процессов

Список литературы

1. Kuvshinsky M.V., Oreshkin S.I., Popov S.M., Rudenko V.N., Yudin I.S., Azarova V.V., Blagov S.V. Tests of cryogenic Fabry-Perot cavity with mirrors on different substrates // Appl. Sci, 2019. V. 9. P. 230.
2. Azarova V.V., Golyaev Y.D., Savel'ev I.I. Zeeman laser gyroscopes // Quantum electronics. 2015. V. 45 (2). P. 171-179.

Д.И. КРАСНОВ, В.В. ДРУЖИН

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

АНАЛИЗ ОШИБКИ УСТАНОВКИ ВЫПУКЛОГО ГИПЕРБОЛИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА ПРИ КОНТРОЛЕ С ПОМОЩЬЮ ДИФРАКЦИОННОГО КОРРЕКТОРА

Проведён анализ влияния ошибки установки гиперболического зеркала на вид интерферограммы. Контроль осуществляется с помощью автоколлимационной схемы с менисковой линзой и планарным дифракционным оптическим элементом.

D.I. KRASNOV, V.V. DRUZHIN

Bauman Moscow State Technical University

ANALYSIS OF POSITIONING ERROR OF CONVEX HYPERBOLOID MIRROR TESTED WITH DIFFRACTIVE CORRECTOR

Analysis of the influence of positioning error of hyperboloid mirror on the interferogram type is performed. Testing is provided using autocollimation scheme with meniscus lens and planar diffractive optical element.

В настоящее время существуют многие методы контроля профиля выпуклых гиперболических поверхностей [1, 2], однако контроль поверхностей с большими апертурными углами в мнимом геометрическом фокусе вызывает большие трудности. Авторами предлагается модификация метода контроля, разработанного в [3, 4]. Модификация заключается в применении дифракционного оптического элемента (ДОЭ) для коррекции аберраций менисковой линзы. Принципиальная схема такого метода контроля показана на рис. 1. Менисковая линза построена таким образом, чтобы мнимое изображение источника после неё совпадало с действительным фокусом гиперболической поверхности, а центр кривизны второй поверхности совпадал с мнимым фокусом.

Данная схема была промоделирована в программе Zemax OpticStudio на примере контррефлектора космического телескопа «Миллиметрон». Среднеквадратическое отклонение формы волнового фронта при использовании He-Ne лазера с длиной волны $0,6328 \text{ мкм}$ не превышает $0,0081 \lambda$, а минимальный период ДОЭ составляет $1,729 \text{ мкм}$. Точность данного метода сильно зависит от точности установки зеркала. Авторами

проведён анализ интерферограмм для трёх ошибок установки зеркала: осевое смещение (рис. 2), децентрировка (рис. 3), наклон (рис. 4).

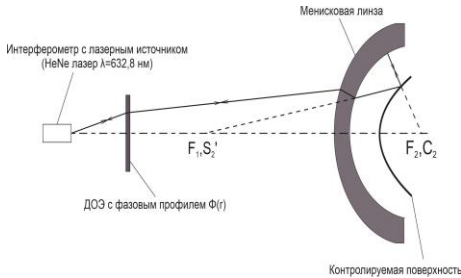
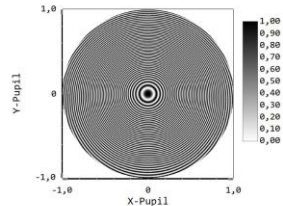
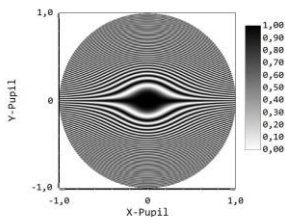


Рис. 1. Принципиальная схема



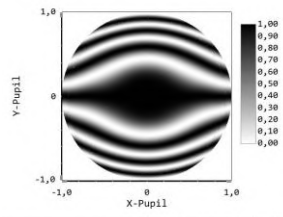
Interferogram between reference beam and Configuration 1	
20.11.2021	
0,4320 um at 0,0000 (deg).	
Peak to Valley = 97,3078 waves, Fringes/Wave = 1,0000.	
Surface: Image	
Exit Pupil Diameter: 2,5800+00 Millimeters	
WtLit = 0,00, WtLit = 0,00.	

Рис. 2. Осевое смещение 10 мкм



Interferogram between reference beam and Configuration 1	
21.11.2021	
0,4320 um at 0,0000 (deg).	
Peak to Valley = 99,5778 waves, Fringes/Wave = 1,0000.	
Surface: Image	
Exit Pupil Diameter: 2,5800+00 Millimeters	
WtLit = 0,00, WtLit = 0,00.	

Рис. 3. Децентрировка 10 мкм



Interferogram between reference beam and Configuration 1	
21.11.2021	
0,4320 um at 0,0000 (deg).	
Peak to Valley = 7,2078 waves, Fringes/Wave = 1,0000.	
Surface: Image	
Exit Pupil Diameter: 2,5800+00 Millimeters	
WtLit = 0,00, WtLit = 0,00.	

Рис. 4. Наклон 1 угл. с

Как видно из рисунков, результаты сильно искажаются при неправильной установке зеркала, что необходимо учесть при юстировке зеркала во время контроля.

Список литературы

1. Burge J.H., Su P., Zhao C. Optical metrology for very large convex aspheres // Proc. SPIE. 2008. V. 7018. P. 701818.
2. Капустин А.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. О контроле формы поверхности зеркал радиотелескопа космической обсерватории «Миллиметрон» // Контенант. 2016. Т. 15. № 4. С. 67-72.
3. Пуряев Д.Т., Дружин В.В., Семенов А.П., Патрикеев В.Е. Интерферометр для контроля формы выпуклых гиперболических зеркал // Контенант. 2020. Т. 19. № 2. С. 6-11.
4. Druzhin V., Puryaev D., Semenov A., Abdulkadyrov M., Patrikeev V. Interferometer for surface figure of large convex hyperboloid mirrors // Proc. SPIE. 2020. V. 11451. P. 114510V.

А.М. ЗОТОВ¹, П.В. КОРОЛЕНКО^{1,2}, Р.Т. КУБАНОВ¹
¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

АЛГОРИТМЫ ГЕНЕРАЦИИ И СВОЙСТВА ФРАКТАЛЬНЫХ СПЕКЛ-ПОЛЕЙ

Исходя из свойств двумерных комплексных функций Мандельброта – Вейерштрасса со случайными фазовыми параметрами, предложены алгоритмы генерации световых пучков с фрактальной спекловой структурой. Алгоритмы позволяют в широких пределах целенаправленно варьировать статистические и скейлинговые характеристики излучения.

A.M. ZOTOV¹, P.V. KOROLENKO^{1,2}, R.T. KUBANOV¹
¹Lomonosov Moscow State University
²Lebedev Physics Institute of the RAS, Moscow

ALGORITHMS OF GENERATION AND PROPERTIES OF FRACTAL SPECKLE FIELDS

Using the properties of two-dimensional complex Mandelbrot – Weierstrass functions with random phase parameters, algorithms for the generation of light beams with a fractal speckle structure are proposed. The algorithms make it possible to purposefully vary the statistical and scaling characteristics of radiation within a wide range.

В настоящее время предложен целый ряд способов получения и использования световых пучков с фрактальной спекловой структурой (например, [1, 2]). Однако моделирование и оптимизация их характеристик требует разработки соответствующих алгоритмов и подходов к многопараметрическому анализу. В данной работе эта задача решается на основе использования свойств комплексной функции Мандельброта – Вейерштрасса, задаваемой формулой (1),

$$F_{x,y} = \sigma \cdot \sum_{v=0}^V \sum_{n=0}^N \frac{\left[1 - e^{ib^n s [x \cdot \cos(\alpha v) + y \cdot \sin(\alpha v)]} \right] e^{i(\psi_n \cdot c + \psi_v \cdot d)}}{b^{(2-D)n}}, \quad (1)$$

где величина F определяет амплитуду поля, дискретные поперечные координаты $0 \leq x, y \leq K-1$ (K – целое число), D характеризует фрактальную размерность; b, s – масштабирующие параметры (первый из

них влияет на размеры спеклов, второй – на коэффициент скейлинга); σ – нормировочный множитель; фазы $\psi_{n,v}$, зависящие от номера гармоник n азимутального индекса v считаются случайными и определяются выражением: $\psi_{n,v} = \text{rnd}(n,v) * 2\pi/(n,v+1)$. Варьируя коэффициенты c и d , можно менять диапазоны изменения соответствующих фаз. Соотношение этих коэффициентов серьезным образом влияет на характеристики спекл-поля. В качестве иллюстрации на рис. 1 показана трансформация графиков функции плотности вероятностей, происходящая при изменении коэффициентов c и d . Здесь же показана структура полностью развитой спекл-картины. Существенным является смещение максимума графика плотности вероятности. Приведённые рисунки соответствуют следующим параметрам: $K = 256$, $D = 1.5$, $b = 2$, $s = 0.21$.

В ходе расчётов было показано, что изменение параметров c , d , а также величин D , s и b позволяет оказывать целенаправленное влияние на статистические и скейлинговые характеристики генерируемых полей. Это указывает на перспективность практического использования фрактальных светофильтров, пропускание которых задаётся выражением (1).

Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 19-12-310).

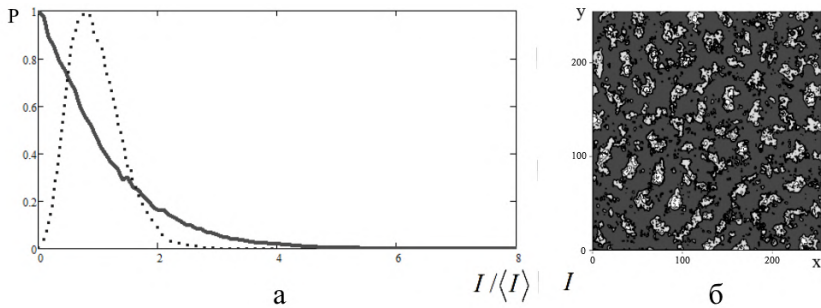


Рис. 1. Графики плотности вероятности P , непрерывная кривая – $c = 1$, $d = 1$, пунктир – $c = 1$, $d = 0.8$ (а); спекл-картина, I – интенсивность (б)

Список литературы

1. Li Z., Li H, Qiu Y. // Proc. of SPIE. 2006. V. 6027. P. 60271S.
2. Kuplicki K., Chan K.W.C. // Optics Express. 2016. V. 24. P. 26766.

Н.Н. ДАВЛЕТШИН^{1,2}, Д.А. ИКОННИКОВ¹, В.С. СУТОРМИН^{1,2},
Ф.А. БАРОН¹, А.М. ВЬЮНЫШЕВ^{1,2}

¹*Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск*

²*Сибирский федеральный университет, Красноярск*

ФОРМИРОВАНИЕ СПЕКЛ-СТРУКТУР ДЛЯ МЕТОДА ФАНТОМНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ НЕМАТИЧЕСКОЙ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ

Рассматривается возможность использования нематической жидkokристаллической (НЖК) ячейки для создания случайных пространственных распределений интенсивности. Продемонстрировано прикладное значение НЖК-ячейки в методе классических фантомных изображений. Проанализировано качество полученного фантомного изображения методом структурного подоби́я.

N.N. DAVLETSHIN^{1,2}, D.A. IKONNIKOV¹, V.S. SUTORMIN^{1,2},
F.A. BARON¹, A.M. VYUNISHEV^{1,2}

¹*Kirensky Institute of Physics of FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk*

²*Siberian Federal University, Krasnoyarsk*

FORMATION OF SPECKLE STRUCTURES FOR GHOST IMAGING BY USING A NEMATIC LIQUID CRYSTAL CELL

The possibility of using a nematic liquid crystal (NLC) cell to produce random spatial intensity distributions is considered. Applicability of NLC cell in the classical ghost imaging is demonstrated. The quality of restored images has been analyzed by the method of structural similarity.

Метод восстановления изображения объекта, т.н. фантомного изображения является нетрадиционным для классической оптики. Это связано с тем, что информацию о объекте хранит функция пространственной корреляции двух сигналов: один из которых взаимодействует с объектом, но не несёт в себе никакой пространственной информации, второй содержит пространственную информацию, но не взаимодействует с объектом [1, 2]. Одной из особенностей таких систем является использование световых полей со случайным распределением интенсивности и фазы (спекл-структур). Для формирования спекл-структур используют различные устройства: пространственные модуляторы света [3], цифровые микрозеркальные устройства [4], вращающиеся матовые стёкла [5] и т.д.

Целью работы является экспериментальное исследование возможности формирования случайного распределения интенсивности при помощи нематической жидкокристаллической (НЖК) ячейки в системе восстановления фантомного изображения.

Экспериментально показана низкая степень взаимных корреляций спекл-структур, генерируемых НЖК-ячейкой. Было восстановлено изображение амплитудной маски с использованием псевдотермического источника света (рис. 1). Для анализа сходства полученного фантомного изображения с исходным объектом был использован индекс структурного сходства.

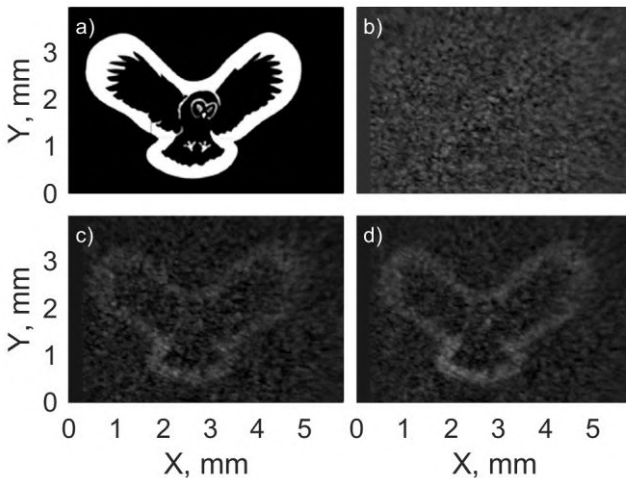


Рис. 1. Амплитудная маска (а), фантомное изображение маски, восстановленное спустя 100 (b), 2500 (c) и 5000 (d) реализаций

Список литературы

1. Padgett M.J., Boyd R.W. // *Phil. Trans.* 2017. V. 75. No. 2099. P. 20160233.
2. Shapiro J., Baris I. // *AIP Conference Proceedings*. 2009. V. 1110. P. 417-422.
3. Sun B., Edgar M., Bowman R. et al. // *Science NY*. 2013. V. 340. P. 844-847.
4. Shapiro J. // *Physical Review A*. 2008. V. 78 P. 061802.
5. Ferri F., Magatti D., Lugiato L., Gatti A. // *Physical Review letters*. 2010. V. 104. P. 253603.

А.О. ИСМАГИЛОВ, Л.С. ЛЕЙБОВ, В.В. ЗАЛИПАЕВ,
Б.Н. НАСЕДКИН, Я.В. ГРАЧЕВ, Н.В. ПЕТРОВ, А.Н. ЦЫПКИН
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ФОРМИРОВАНИЕ СПЕКЛ-СТРУКТУР С ПОМОЩЬЮ ШИРОКОПОЛОСНОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ GHOST IMAGING

Приведены результаты моделирования процесса формирования спекл-структур при прохождении широкополосного терагерцового излучения через прозрачный объект со случайной фазовой неоднородностью. Экспериментально продемонстрирована возможность получения спекл-структур при прохождении широкополосного терагерцового излучения через случайные фазовые объекты. Представлены зависимости размера и резкости отдельных спеклов от параметров случайной фазовой поверхности, а также приведены результаты моделирования восстановления изображений объектов в технике ghost imaging при использовании полученных спекл-структур.

A.O. ISMAGILOV, L.S. LEIBOV, V.V. ZALIPAIEV, B.A. NASEDKIN,
Ya.V. GRACHEV, N.V. PETROV, A.N. TCYPKIN
ITMO University, Saint-Petersburg

SPECKLE PATTERNS FORMED BY BROADBAND TERAHERTZ RADIATION AND THEIR APPLICATIONS FOR GHOST IMAGING

The results of modeling the speckle structures formation process during the broadband terahertz radiation propagation through a transparent object with a random phase inhomogeneity are presented. The possibility of obtaining speckle structures by broadband THz radiation propagation through random phase objects. The dependences of the size and sharpness of individual speckles on the parameters of a random phase surface are presented, as well as the results of modeling the reconstruction of images of objects in the ghost imaging technique using the obtained speckle structures.

Спекл-структуры – это изображения случайного характера, формируемые при прохождении когерентного излучения через рассеивающую среду или его отражения от шероховатой поверхности [1]. Несмотря на отрицательное влияние спекл-шума для некоторых методов, существуют применения спекл-структур являющиеся многообещающими [2]. Терагерцовое (ТГц) излучение, благодаря оптическим свойствам

материалов в данном диапазоне частот, а также особенностям самого излучения, находит своё применение в различных областях [3]. Формирование спекл-структур для ТГц-излучения начинает детально изучаться только в настоящее время. Спекл-структуры в ТГц-диапазоне были впервые получены с использованием монохроматического непрерывного ТГц-излучения [4].

Целью работы является численная и экспериментальная демонстрация формирования спекл-структур при прохождении ТГц-излучения через прозрачный объект со случайной фазовой неоднородностью – диффузор – и моделирование процесса восстановления изображений объектов методом ghost imaging при использовании полученных спекл-структур.

Численное моделирование формирования спекл-структур производилось на основе процесса распространения излучения с заданными спектральными и пространственными характеристиками через диффузор с выбранными параметрами среды. Восстановление изображений происходит методом ghost imaging.

В эксперименте использовался ТГц-визуализатор на основе электрооптического эффекта в кристалле ZnTe . Генерация ТГц-излучения происходила на кристалле MgO:LiNbO_3 с использованием фемтосекундного излучения: длительность импульса 35 фс; энергия импульса 1 мДж; центральная длина волны 790 нм. В качестве диффузоров использовались напечатанные на 3D-принтере пластинки из АБС пластика ($n_{\text{ТГц}} = 1,55$) со случайной поверхностью.

В результате проведённой работы было экспериментально и численно продемонстрирована возможность формирования спекл-структур при использовании широкополосного ТГц-излучения. Продemonстрирована сильная зависимость статистических параметров спеклов, таких как размер и резкость, от параметров диффузора. Размеры спеклов полученных в эксперименте соответствуют результатам численного моделирования. Методами численного моделирования была продемонстрирована возможность использования сформированных спекл-структур для реализации техники ghost imaging.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобнауки РФ в рамках Государственного задания (Паспорт № 2019-0903)

Список литературы

1. Goodman J.W. Speckle phenomena in optics. Theory and applications. Roberts & Co, 2007.
2. Erf R. (ed.). Elsevier, 2012.
3. Gowen A.A., O'Sullivan C., O'Donnell C. P. // Trends in Food Science & Technology. 2012. V. 25 (1). P. 40-46.
4. Khasanov I.S., et al. //AIP Conference Proceedings. 2020. V. 2299 (1). P. 030008.

С.А. БЫЧКОВА^{1,2}, Ф.А. МИНАКОВ², Л.В. МАКСИМОВ²,
А.А. МАМРАШЕВ², Н.А. НИКОЛАЕВ²

¹Новосибирский государственный технический университет

²Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ ТЕРАГЕРЦОВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

В работе разработана система терагерцовой поляризационной спектроскопии кристаллов на основе плёночных решётчатых поляризаторов. Подход, основанный на аппроксимации с помощью формализма Мюллера измеренных зависимостей угла поворота скрещённых поляризаторов относительно главных оптических осей кристалла, позволил с точностью не хуже $0,5^\circ$ определить дисперсию угла поворота диэлектрического тензора в кристаллах различной сингонии (LBO, BIBO и GUHP), что было проделано впервые для ТГц-частот. Максимальное значение дисперсии наблюдается в кристалле GUHP, и составляет $2,3^\circ$ на 100 ГГц.

S.A. BYCHKOVA^{1,2}, F.A. MINAKOV², L.V. MAKSIMOV²,
A.A. MAMRASHEV², N.A. NIKOLAEV²

¹Novosibirsk State Technical University

²Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk

POLARIZATION TERAHERTZ SPECTROSCOPY

Here we present, the system of terahertz polarization spectroscopy for crystals studying based on film grid polarizers. The approach is based on the approximation of the measured dependences of crossed polarizers rotation angle relative to the main optical axes of the crystal using the Mueller formalism. It allows determine the dispersion of the dielectric tensor rotation angle in crystals of different systems (LBO, BIBO, and GUHP) which was done for the first time. The maximum dispersion is observed in the GUHP crystal, and it has the value of 2.3° for 100 GHz.

Данная работа посвящена разработке кристаллооптического поляризационного метода исследования в терагерцовом (ТГц) диапазоне с использованием плёночных решётчатых поляризаторов. При его оптической реализации основная трудность связана с отсутствием высококонтрастных ТГц-поляризаторов ($> 10^5$) и задержкой ими подавляемой волны на 90° по фазе. В связи с чем, целью работы является исследование свойств используемых «неидеальных» ТГц-поляризаторов в составе системы непрерывной перестраиваемой поляризационной

спектроскопии и поиск способа их точной настройки и установки для исследования кристаллических сред.

Для апробации предложенного метода выполнены исследования частотной зависимости поворота главных оптических осей кристаллов различной сингонии (LBO, VBO и GUNP). С использованием ранее экспериментально измеренных свойств поляризаторов (коэффициенты пропускания для собственных поляризаций) и исследуемых кристаллов (показатели преломления и коэффициенты поглощения), с помощью формализм Мюллера [1], аппроксимирована зависимость сигнала от поворота скрещённых поляризаторов относительно главных оптических осей кристаллов.

В ходе исследования частотная дисперсия угла поворота главных оптических осей (диэлектрического тензора) в кристаллах LBO и VBO не наблюдается с точностью до погрешности $0,5^\circ$. Для кристалла GUNP в диапазоне от 300 до 850 ГГц обнаружена линейная дисперсия составляющая $2,3^\circ$ на 100 ГГц.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института автоматики и электрометрии СО РАН.

Авторы выражают благодарность Центру коллективного пользования «Спектроскопия и оптика» ИАиЭ СО РАН за предоставленный ТГц-спектрометр и ЦКП «ВТАН НГУ» за предоставленные ТГц-поляризаторы.

Список литературы

1. Ищенко Е.Ф., Соколов А.Л. Поляризационная оптика. М.: Физматлит, 2012.

Е.Г. ЦИПЛАКОВА, Н.В. ПЕТРОВ, Ж.-Б. ПЕРРО¹, А. ЧОПАРД^{1,2},
Ж.-П. ГИЙЕ¹, О.А. СМОЛЯНСКАЯ, П. МОНЕ¹

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

¹*Университет Бордо, Франция*

²*Компания Литид, Париж, Франция*

ОПТИМИЗИРОВАННЫЕ ИТЕРАЦИОННЫЕ АЛГОРИТМЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФАЗЫ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ТЕРАГЕРЦОВОМУ ДИАПАЗОНУ ЧАСТОТ

Проведено восстановление фазы объектного терагерцового волнового фронта из распределений интенсивности, полученных в схеме на пропускание при помощи оптимизированных алгоритмов классического SBMIR-метода. Представлены результаты, демонстрирующие улучшение реконструкции волнового фронта в плоскости объекта при использовании оптимизаций SBMIR алгоритма, включающих: неупорядоченное распространение поля; экстраполяцию данных за пределы области регистрации.

E.G. TSIPLAKOVA, N.V. PETROV, J.-B. PERRAUD¹, A. CHOPARD^{1,2},
J.-P. GUILLET¹, O.A. SMOLYANSKAYA, P. MOUNAIX¹

ITMO University, Saint-Petersburg

¹*University of Bordeaux, France*

²*Lytid SAS, Paris, France*

OPTIMIZED ITERATIVE PHASE RETRIEVAL ALGORITHMS IN APPLICATION TO TERAHERTZ FREQUENCY RANGE

Terahertz object wavefield reconstruction from intensity distributions, detected in the regime in transmission, is carried out by modified algorithms of the classical SBMIR method. The results demonstrating the improvement of wavefront reconstruction in the object plane by implementation of the following optimizations of SBMIR: unordered wavefield propagation; extrapolation of data beyond the registration area, are presented.

В настоящее время в терагерцовой (ТГц) оптике большое внимание уделяется задаче измерения фазовых характеристик волнового поля, так как амплитудного распределения часто бывает недостаточно (например, в задачах 3D-визуализации) для описания свойств исследуемого объекта. Среди техник восстановления фазы объектного волнового фронта широкое применение получили итерационные алгоритмы. Одним из популярных является алгоритм SBMIR [1], в котором восстановление фазы производится из экспериментально измеренных на удалении от объекта наборов интенсивностей. Вследствие уникальных свойств

ТГц-диапазона [2], его использование в задачах визуализации открывает возможности повышения качества и контраста восстанавливаемых изображений. Однако в настоящее время существует ряд ограничений, связанный с небольшой элементной базой эффективных источников и приёмников ТГц-излучения. В связи с этим актуальной задачей является повышение эффективности восстановления фазы ТГц-излучения на этапе алгоритмической обработки.

Целью работы являлось исследование оптимизированных алгоритмов (алгоритма неупорядоченного распространения волнового фронта (SBMIR-U) [3]; алгоритма экстраполяции данных за пределы области регистрации (SBMIR-S) [4]) в реконструкции объектного волнового фронта при использовании в качестве начальных данных ТГц электромагнитных распределений поля. Измерения проводились в схеме на пропускание с использованием квантово-каскадного лазера в качестве источника (частота 2,5 ТГц, мощность 1,3 мВт) и матричного детектора от I2S в качестве детектора (288×384 , размер пикселя 50 мкм). В качестве объекта использовалась пластиковая карта с нанесённым рельефным изображением. Расстояние от объекта до первого зарегистрированного распределения интенсивности и шаг между последующими распределениями были выбраны $z_1 \cong 9,7$ мм и $\Delta z = 2$ мм соответственно. Оба модифицированных алгоритма продемонстрировали улучшение качества восстановления ТГц объектного волнового фронта (рис. 1). SBMIR-U обеспечил более быструю сходимость, а SBMIR-S продемонстрировал лучшие результаты при реконструкции волнового фронта из далеко расположенных от объекта распределений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 21-52-15035 НЦНИ_a.

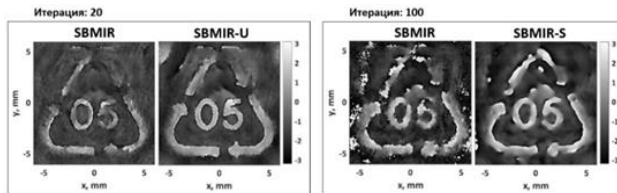


Рис. 1. Восстановление фазы объектного терагерцового волнового фронта при помощи алгоритмов SBMIR, SBMIR-U и SBMIR-S

Список литературы

1. Pedrini G., et al. // Optics Letters, 2005. V. 30(8). P. 833-835.
2. Gao X., et al. // Chinese Physics Letters. 2013. V. 30. No. 6. P. 068401.
3. Binamira J.F., Almoro P.F. // Optics Letters. 2019. V. 44 (12). P. 3130-3133.
4. Zhengzhong H., et al. // Optics Communications. 2021. V. 481. P. 126526.

Д.В. ОБЫДЕННОВ^{1,2}, К.Б. ЮШКОВ¹, В.Я. МОЛЧАНОВ¹

¹*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Москва*

²*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАХВАТА КОЛЬЦЕВОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ЛОВУШКИ НА ОСНОВЕ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО ФИЛЬТРА

Представлена оптическая ловушка с кольцевым распределением потенциала на основе акустооптического перестраиваемого фильтра. Продемонстрирован устойчивый захват полистироловых микросфер в составе водной суспензии. Проведено численное исследование эффективности захвата полученной ловушки и определены условия стабильного пленения частиц разного размера.

D.V. OBYDENNOV^{1,2}, K.B. YUSHKOV¹, V.Ya. MOLCHANOV¹

¹*National University of Science and Technology MISIS, Moscow*

²*Lomonosov Moscow State University*

STUDY OF THE TRAPPING EFFICIENCY OF A RING OPTICAL TRAP BASED ON AN ACOUSTO-OPTIC TUNABLE FILTER

Here we present an optical trap with a ring-shaped potential distribution based on an acousto-optical tunable filter. The stable trapping of polystyrene microspheres in an aqueous suspension is demonstrated. A numerical study of the trapping efficiency of the obtained trap has been carried out and the conditions of stable capturing of particles of different sizes have been determined.

Область использования оптических ловушек включает в себя множество дисциплин, от биохимии до квантовой оптики. Современные методики оптического манипулирования позволяют одновременно контролировать сразу несколько объектов, от массива одиночных атомов до биологических клеток [1]. В настоящее время активно развиваются методы создания различных конфигураций световых полей, среди которых особое место занимают кольцевые поля ввиду их важности в квантовой оптике [2] и в оптической сортировке биологических микрообъектов [3].

В настоящей работе исследуется оптическая ловушка с кольцевым распределением потенциала, созданного с помощью акустооптического

перестраиваемого фильтра (АОПФ). На основе собранной схемы, включающей АОПФ собственного изготовления, продемонстрирован устойчивый захват (рис. 1) полистироловых сфер диаметром 10 мкм [4]. Радиус кольцевого потенциала контролировался с помощью управляющей электроники. Продemonстрирован многочастотный режим управления АОПФ, позволяющий создавать многокольцевые динамические ловушки.

Теоретическая оценка эффективности захвата проводилась методом конечных разностей во временной области (FDTD). С помощью этого метода находилось прямое численное решение уравнений Максвелла для рассеяния поля с кольцевым профилем на полистироловой сферической частице. Сила, действующая на частицу, находилась путём интегрирования объёмной силы [5]. В результате получено, что ловушка обладает максимальной радиальной силой в 1 пН и жёсткостью около 0.4 пН/мкм. Дополнительно исследовалась глубина потенциала для частиц в диапазоне размеров 20 нм – 10 мкм. Из сравнения величины потенциала с характерной энергией тепловых колебаний kT делался вывод о минимальной оптической мощности, необходимой для достижения устойчивого захвата частиц в кольцевом потенциале.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (20-12-00348).

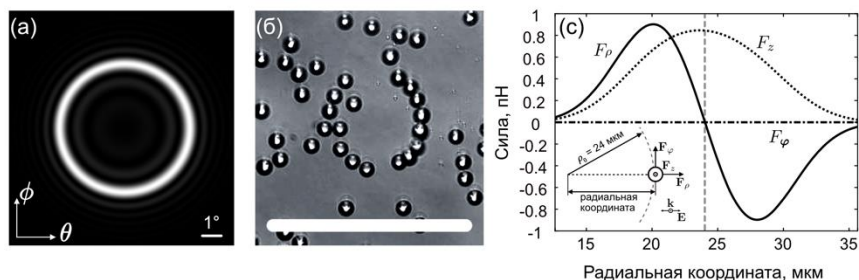


Рис. 1. Рассчитанная угловая передаточная функция АОПФ на кристалле парателлурита для частоты ультразвука 133.1 МГц (а), изображение захваченных в кольцевую оптическую ловушку полистироловых микросфер, масштабный отрезок соответствует 100 мкм (б), расчёт оптической силы, действующей на полистироловую частицу в кольцевой ловушке, на вставке – геометрия расчёта (с)

Список литературы

1. Jones P., Maragó O., Volpe G. Optical Tweezers: Principles and Applications. 2015.
2. Balykin V.I., Minogin V.G., Letokhov V.S. // Reports Prog. Phys. V. 63. № 9. P. 1429.
3. Shao B., et al. // Biomed. Microdevices. 2007. V. 9. № 3. P. 361-369.
4. Obydenov D.V., Yushkov K.B., Molchanov V.Ya. // Opt. Lett. 2021. V. 46. № 18. P. 4494.
5. <https://support.lumerical.com/hc/en-us/articles/360042214594-Methodology-for-optical-force-calculations> (accessed 30.11.2021).

Т.Н. САБИРОВ, М.М. МИННЕГАЛИЕВ,
К.И. ГЕРАСИМОВ, С.А. МОИСЕЕВ

*Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ, Казанский квантовый центр*

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОТОКОЛА ОПТИЧЕСКОЙ КВАНТОВОЙ ПАМЯТИ В КРИСТАЛЛЕ $^{167}\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$

В данной работе был экспериментально реализован протокол квантовой памяти в схеме восстановления сигнала подавленного эха (ROSE) в кристалле $^{167}\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ на телекоммуникационной длине волны. Достигнута эффективность хранения 54 %, при времени хранения 40 мкс.

T.N. SABIROV, M.M. MINNEGALIEV,
K.I. GERASIMOV, S.A. MOISEEV

*Kazan Quantum Centre of Kazan National Research Technical University
named after A.N. Tupolev – KAI*

IMPLEMENTATION OF OPTICAL QUANTUM MEMORY PROTOCOL IN $^{167}\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ CRYSTAL

We implemented photon echo quantum memory scheme for weak input optical pulses in the revival of silenced echo memory protocol in a $^{167}\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ crystal. The storage efficiency of 54 % for a storage of time of 40 μs was achieved for light pulses at telecom wavelength.

Разработка эффективной многокубитовой квантовой памяти является одной из наиболее важных задач в оптических квантовых технологиях [1]. Перспективными материалами для создания оптической квантовой памяти являются активированные редкоземельными ионами кристаллы [2], оптические переходы которых могут обладать большими временами когерентности (до единиц миллисекунд) при криогенных температурах.

Данная работа посвящена реализации протокола восстановления сигнала подавленного эха (ROSE) [3] в кристалле $^{167}\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ (с = 0.005 ат.%). Оптический переход $^4\text{I}_{15/2} - ^4\text{I}_{13/2}$ ионов эрбия в кристалле Y_2SiO_5 интересен тем, что его длина волны $\lambda = 1536$ нм лежит в первом окне прозрачности стандартного телекоммуникационного оптоволокна. Кроме того, ионы обладают довольно большими временами когерентности оптического перехода 1,4 мс во внешнем магнитном поле и с неоднородным уширением спектральной линии порядка 500 МГц [1].

Наличие сверхтонких подуровней $^{167}\text{Er}^{3+}$ позволяет реализовать долгоживущую квантовую память на спиновых состояниях, поскольку время когерентности между данными уровнями может достигать одной секунды, как было показано в работе [4]. В нашем эксперименте использовался перестраиваемый одночастотный диодный лазер, который был настроен на длину волны $\lambda = 1536,46$ нм, что соответствует переходу $^4I_{15/2} - ^4I_{13/2}$. Кристалл охлаждался до 1.3 К в криостате замкнутого цикла со сверхпроводящим магнитом. Входной сигнал и управляющие лазерные импульсы распространялись в противоположных направлениях вдоль оси b кристалла. В этом кристалле мы реализовали протокол оптической квантовой памяти ROSE с эффективностью 54 % при времени хранения 40 мкс для ярких входных световых импульсов, которые содержали в себе $\sim 10^8$ фотонов. Затем мы ослабили входной импульс, чтобы он содержал в себе ~ 90 фотонов. В этом случае восстановленный эхо-сигнал (рис. 1) содержал около 45 фотонов для единичного отношения сигнал / шум. Эффективность восстановления приведена на рис. 2. Шум в основном вызван спонтанным излучением из-за остаточной населённости в возбуждённом состоянии после последовательности рефазировки.

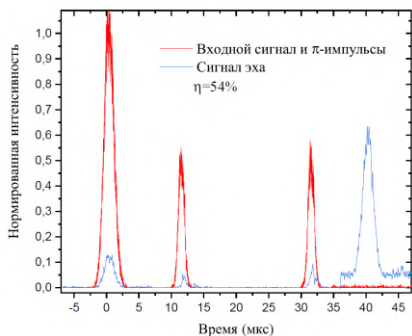


Рис. 1. Сигнал восстановления подавленного эха для одиночных световых импульсов

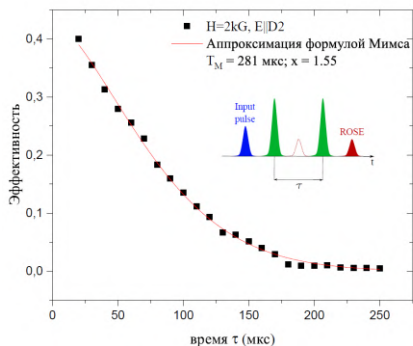


Рис. 2. Эффективность восстановления ROSE в зависимости от времени хранения τ

Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 21-72-00115).

Список литературы

1. Heshami K., et. al. // Journal of Modern Optics. 2016. V. 63. No. 20. P. 2005.
2. Thiel C.W., Böttger T., Cone R.L. // Journal of Luminescence. 2011. V. 131. No. 3. P. 353.
3. Damon V., et. al. // New Journal of Physics. 2011. V. 13. P. 093031.
4. Rančić M., et.al. // Nature Physics. 2018. V. 14(1).

С.И. ЯКУБОВ, Б.В. СОКОЛЕНКО, Н.В. ШОСТКА,
Д.А. ПОЛЕТАЕВ

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь

ПРОФИЛОМЕТРИЯ ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНЫХ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРФЕРИРУЮЩИХ СИНГУЛЯРНЫХ ПУЧКОВ

В данной работе исследуется картина интерферирующих сингулярных пучков, прошедших изотропный оптически прозрачный объект, с целью извлечения информации о состоянии поверхности – шероховатости и толщине образца. Для этого оптический вихрь применён в качестве зондирующего элемента в интерференционных измерениях. Благодаря наличию геликоидального волнового фронта, становится возможным отслеживание малых изменений в фазы такого пучка. В предложенном методе предлагается использовать суперпозиции пучков лагерь-гаусса с противоположными топологическими знаками.

S.I. YAKUBOV, B.V. SOKOLENKO, N.V. SHOSTKA,
D.A. POLETAEV

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

PROFILOMETRY OF OPTICALLY TRANSPARENT OBJECTS USING INTERFERING SINGULAR BEAMS

In this paper, we study the pattern of interfering singular beams that have passed through an isotropic optically transparent object in order to extract information about the state of the surface – roughness and thickness of the sample. For this purpose, an optical vortex is use as a probing element in interference measurements. Due to the presence of a helicoidally wavefront, it becomes possible to track small changes in the phases of such a beam. In the proposed method, it is propose to use superpositions of Laguerre-Gauss beams with opposite topological signs.

В ряде работ, продемонстрирован подход, позволяющий извлечь информацию о состоянии поверхности – шероховатости и толщине образца [1, 2]. С этой целью оптический вихрь применён в качестве зондирующего элемента в интерференционных измерениях. Благодаря наличию геликоидального волнового фронта, становится возможным отслеживание малых изменений фазы такого пучка. Основные экспериментальные приёмы использования оптических вихрей представляют собой два вида суперпозиции предметного вихревого пучка

и опорного гауссового пучка в наклонном и осевом исполнении, результатом чего является формирование линий равной ширины и линии равного наклона. Дальнейший анализ таких картин позволяет извлечь фазу предметного пучка.

Для упрощения анализа интерференционной картины отслеживалась динамика изменений интенсивности суперпозиции пучков и её связь с изменениями фазы в сингулярных пучках, распространяющихся строго соосно и имеющих близкие перетяжки и кривизну волнового фронта. В частности, рассматривалась суперпозиция двух вихревых пучков с равными по модулю и противоположными по знакам топологическими зарядами, на рис. 1 приведён численный расчёт и моделирование распределения интенсивности данных пучков.

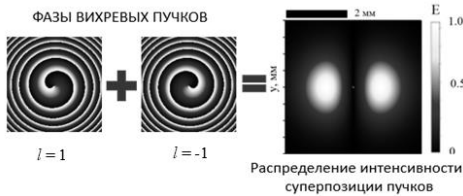


Рис. 1. Результирующая картина суперпозиции двух вихревых пучков

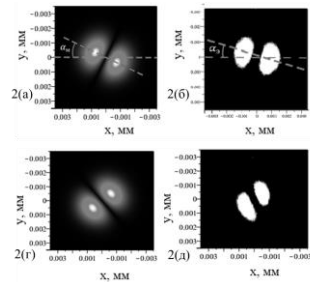


Рис. 2. Интерференционные картины на первом образце

На рис. 2 представлен результат сравнения теоретического расчёта и экспериментально полученного распределения интенсивности для заданной разности хода: моделирование (рис. 2а) и экспериментальные (рис. 2б) при нормальном падении; моделирование (рис. 2с) и экспериментальные (рис. 2д) в случае, когда оптическая задержка луча $L \sim 100$ нм, угол между осями симметрии $\sim 60^\circ$.

Для калибровки показателей экспериментальной схемы была использована тонкая плоскопараллельная пластина с известной толщиной и показателем преломления, ориентированная под разными углами. Получена зависимость оптической разности хода от угла поворота.

Список литературы

1. Fraczek E., Popiolek-Masajada A., Szczepaniak S. // Photonics. 2020. V. 7(4). P. 102.
2. Serrano-Trujillo A., Anderson M.E. // Optics Communications. 2018. V. 427. P. 557-562.
3. Sokolenko B., Shostka N., Karakchieva O., Volyar A.V., Poletaev D. // Компьютерная оптика. 2017.

Д.В. ПРОКОПОВА, С.А. САМАГИН, С.П. КОТОВА
Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

**ФОРМИРОВАНИЕ ВРАЩАЮЩИХСЯ СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ
С ДВУМЯ ВЫРАЖЕННЫМИ МАКСИМУМАМИ
В РАСПРЕДЕЛЕНИИ ИНТЕНСИВНОСТИ ПРИ ПОМОЩИ
КОМБИНИРОВАННЫХ ДВУХСЕКЦИОННЫХ
ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Приведены результаты экспериментов по формированию дуолепестковых световых полей с вращением распределения интенсивности при распространении с помощью комбинированных двухсекционных оптических элементов. Элементы представляют собой комбинацию линз, призм, аксиконов и спиральных фазовых пластин. Определены углы поворота и изменения кривизны волнового фронта, при которых два максимума в распределении интенсивности сохраняются.

D.V. PROKOPOVA, S.A. SAMAGIN, S.P. KOTOVA
Samara Branch of Lebedev Physical Institute of the RAS

**FORMATION OF THE ROTATING LIGHT FIELDS
WITH TWO EXPRESSED MAXIMUMS
IN THE DISTRIBUTION OF INTENSITY USING COMBINED
TWO-SECTIONAL OPTICAL ELEMENTS**

The results of experiments on the formation of two-lobe light fields with rotation of the intensity distribution during propagation using combined two-section optical elements are presented. The elements are a combination of lenses, prisms, axicons and spiral phase plates. The angles of rotation and changes in the curvature of the wavefront at which two maxima in the force distribution are retained are determined.

Активно развивающаяся последние тридцать лет оптика структурированных световых полей нашла своё применение во многих приложениях [1]. Одно из применений таких световых полей продольная локализация положения точечного излучающего объекта в микроскопии с субдифракционной точностью [2 - 5]. С высокой точностью определить осевое положение удаётся за счёт модификации аппаратной функции системы. Перспективным и простым для последующей обработки полученных изображений является метод преобразования излучения, собранного от точечного источника, во вращающееся при распространении поле, в распределении интенсивности которого можно

выделить два ярких максимума [4]. Для краткости будем называть такие световые поля двулепестковые. В этом случае продольное положение излучающей наноразмерной метки можно однозначно связать с углом наклона прямой, проходящей через центры максимумов в полученном изображении. Эффективно и качественно такие световые поля можно формировать при помощи дифракционных оптических элементов. Существуют различные способы по их созданию.

Элемент, формирующий двулепестковое световое поле, можно получить при помощи итерационной процедуры [4, 6, 7]. Можно подойти к созданию двухлепесткового светового поля, не прибегая к использованию итерационных процедур, пользуясь некоторыми закономерностями работы определённых оптических элементов или их сочетаний [8, 9].

В работе рассмотрена возможность создания двулепесткового светового поля, вращающегося при распространении, с помощью двухсекционных оптических элементов: бипризма, билинза, усечённый биаксикон. Для их реализации применялись специальная программа и фазовый жидкокристаллический пространственно-временной модулятор света Holoeye 1080P. Рассмотренные комбинации оптических элементов позволяют на определённых расстояниях вблизи плоскости фокусировки сформировать двухлепестковую картину, которая будет претерпевать поворот при распространении и фокусировке. Анализ экспериментальных данных позволил оценить углы поворота и изменения кривизны волнового фронта, при которых два максимума в распределении интенсивности сохраняются.

Список литературы

1. Rubinsztein-Dunlop H., Forbes A., et al. // Journal of Optics. 2016. V. 19. No. 1. P. 013001.
2. Greengard A., Schechner Y.Y., Piestun R. // Optical Science and Technology, the SPIE 49th Annual Meeting. International Society for Optics and Photonics. 2004. P. 91.
3. Huang B., Wang W., Bates M., Zhuang X. // Science. 2008. V. 319 (5864). P. 810.
4. Pavani S.R.P., Piestun R. // Optics express. 2008. V. 16 (5). P. 3484.
5. Shechtman Y., Sahl S.J., et al. // Physical Review Letters. 2014. V. 113 (13). P. 133902.
6. Wang W., et al. // Optics Express. 2019. V. 27. No. 3. P. 3799.
7. Волостников В.Г. и др. // Известия РАН. Серия Физическая. 2016. Т. 80 (7). С. 841.
8. Grover G., Piestun R. // Single Molecule Spectroscopy and Superresolution Imaging VI. International Society for Optics and Photonics. 2013. V. 8590. P. 85900M.
9. Baranek M., Boucha Z. // Journal of the European Optical Society-Rapid publications. 2013. V. 8. P. 13017.

А.А. БУРЦЕВ, В.В. ИОНИН, А.В. КИСЕЛЕВ, Н.Н. ЕЛИСЕЕВ,
В.А. МИХАЛЕВСКИЙ, А.А. ЛОТИН

*Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиал
ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Шатура*

ЭЛЕМЕНТЫ ОПТИЧЕСКИХ НЕЙРОМОРФНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ФАЗОИЗМЕНЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

В работе представлены исследования оптического переключения тонкой плёнки фазоизменяемого материала GST_{225} , реализация и экспериментальное исследование прототипа оптического синапса на основе интерфейса между полимерным волноводом и оптически управляемым элементом на основе плёнки. Продемонстрирована возможность управления проходящим через волновод сигналом внешним лазерным воздействием на оптически-активный элемент.

A.A. BURTSEV, V.V. IONIN, A.V. KISELEV, N.N. ELISEEV,
V.A. MIKHALEVSKY, A.A. LOTIN

*Institute on Laser and Information Technologies of RAS – Branch of FSRC
“Crystallography and Photonics” of RAS, Shatura*

OPTICAL NEUROMORPHIC SYSTEMS ELEMENTS BASED ON PHASE-CHANGE MATERIALS

Presents the results of optical switching of the GST_{225} thin film, an optical synapse prototype based on the interface between the polymer waveguide and an optically controlled film. We demonstrate the possibility of controlling an optical signal as it passes through waveguide by the action of an external laser on an optically active film.

Передача и хранение информации исключительно с помощью оптических технологий весьма желательна из-за изначально большой полосы пропускания, низких остаточных перекрестных помех и высокой скорости передачи информации по сравнению с электронными полупроводниковыми схемами [1]. Параллельно с развитием технологий изготовления оптических планарных волноводов шёл поиск методов и архитектур, способных обеспечить платформу для создания модулей хранения данных и полностью оптических вычислений. Нейроморфные вычисления объединяют вычисления с хранилищем в одной ячейке, знаменуя переход к вычислительным архитектурам, отличным от традиционной схемы фон Неймана [2].

Наиболее заметные успехи в реализации этой идеи были достигнуты при использовании фазоизменяемых материалов, таких как GST_{225} [3, 4].

Сильный контраст оптических свойств для аморфной и кристаллической фаз, а также высокие скорости фазовых превращений делают этот материал наиболее перспективным на сегодняшний день для многих оптоэлектронных приложений. В [5] приводятся схемы конфигурации устройства, в которой ФИМ наносится поверх оптического волновода из нитрида кремния. Информация записывается непосредственно через величину оптического пропускания волновода, управляемую внешними импульсами. С помощью мощного лазерного импульса в масштабе времени нано- или субнано-секунд GST₂₂₅ переключается между кристаллической и аморфной фазами [6, 7]. Несмотря на достигнутые успехи в экспериментальной реализации прототипов устройств оптических синапсов, создание синапсов на основе твердотельных оптических волноводов несёт в себе определённые технологические трудности, что обуславливает сложность и дороговизну при производственном внедрении. Интегрированная фотоника на основе полимеров предлагает ряд преимуществ по сравнению с кремнием в ряде применений [8].

В работе представлен разработанный оптический синапс на основе интерфейса между полимерным волноводом и оптически управляемой тонкой плёнкой (50 нм) GST₂₂₅. При однократном импульсном воздействии ($\lambda = 532$ нм, $\tau = 15$ нс, $E = 33$ мДж/см²), продемонстрировано изменение уровня проходящего сигнала ($\lambda = 1550$ нм) с последующим восстановлением прежнего уровня пропускания [9]. Предложенная концепция создания оптических синапсов является самой дешевой из всех известных планарных технологий создания волноводных оптических синапсов и позволяет реализовать вычислительные элементы и архитектуры на их основе с высокой степенью гетерогенной интеграции.

Список литературы

1. Chai Z., Hu X., Wang F., et al. // Adv. Opt. Mater. 2017. V. 5. № 7. P. 1600665.
2. Zhang W., Mazzeo R., Wuttig M., et al. // Nat. Rev. Mater. 2019. V. 4. P. 150-168.
3. Ovshinsky S.R. // Jpn. J. Appl. Phys. 2004. V. 43. P. 4695.
4. Kuzum D., Jeyasingh R.G., Lee B., et al. // Nano. Lett. 2012. V. 12. P. 2179-2186.
5. Han S-T., Zhou Y. Photo-Electroactive Non-Volatile Memories for Data Storage and Neuromorphic Computing. Woodhead Publishing, 2020.
6. Lu H., Thelander E., Gerlach J.W., et al. // Adv. Funct. Mater. 2013. V. 23. № 29. P. 3621–3627.
7. Kiselev A.V., Ionin V.V., Burtsev A.A., et al. // Optics & Laser Technology. 2022. V. 147. P. 107701.
8. Sokolov V. I., Mishakov G. V., Panchenko V. Y., et al. // Opt. Mem. Neural Networks. 2007. V. 16. № 2. P. 67-74.
9. Ionin V.V., Kiselev A.V., Burtsev A.A., et al. // Appl. Phys. Lett. 2021. V. 119. P. 081105.

Д.А. ИКОННИКОВ¹, В.А. ФОКИН^{1,2}, А.М. ВЬЮНЫШЕВ^{1,2}

¹*Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск*

²*Сибирский федеральный университет, Красноярск*

ПОЛУЧЕНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ МАССИВОВ ОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ С ПОМОЩЬЮ БИНАРНЫХ ФАЗОВЫХ ГОЛОГРАММ

Рассмотрен неитеративный подход синтеза бинарных фазовых голограмм для получения комплексных массивов оптических вихрей. Данный подход не требует выполнения обратного фурье-преобразования и позволяет получать желаемые массивы оптических вихрей с заданными топологическими зарядами. Показано, что данный метод позволяет, в том числе, получать комплексные оптические поля, содержащие структуры из оптических вихрей. Предложенный метод может найти применение для приложений, связанных с взаимодействием света с веществом, таких как оптические ловушки и оптические пинцеты.

D.A. IKONNIKOV¹, V.A. FOKIN^{1,2}, A.M. VYUNISHEV^{1,2}

¹*Kirensky Institute of Physics of FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk*

²*Siberian Federal University, Krasnoyarsk*

PRODUCING COMPLEX ARRAYS OF OPTICAL VORTICES USING BINARY PHASE HOLOGRAMS

A non-iterative approach to synthesizing binary phase holograms for producing complex arrays of optical vortices is considered. This approach does not require an inverse Fourier transform and allows one to obtain arrays of optical vortices with topological charges desired. It is shown that this method makes possible to obtain complex optical fields containing the superposition of optical vortices. The proposed method can find applications related to light-matter interactions such as optical traps and tweezers.

Оптические вихри (ОВ) представляют собой структурированные световые пучки с фазовыми сингулярностями, сложной амплитудой и спиральным волновым фронтом [1]. ОВ используются в оптических пинцетах [2], оптической связи [3], микроскопии сверхвысокого разрешения [4]. Недавно сообщалось о многоадресном канале рассылки «один ко многим» в свободном пространстве на основе кодирования орбитального углового момента (ОУМ) ОВ [5]. Было продемонстрировано мультиплексирование сигнала на четыре различных приёмника. В [6] была продемонстрирована система передачи данных в свободном пространстве,

основанная на восьмибитном многоуровневом ОУМ-мультиплексировании. Особый интерес представляют пространственные массивы ОВ; они перспективны для микрообработки и структурирования [7], 2D оптического захвата и сортировки [8], осуществления микроманипуляций в биологии и медицине [9].

Простейший способ получения массивов ОВ заключается в освещении периодической решётки ОВ или использовании решёток с дислокациями (так называемые вилкообразные структуры). В обоих случаях полученные вихри равноудалены друг от друга, поскольку их положения определяются порядками дифракции для рассматриваемого значения вектора обратной решётки (ВОР). В первом случае мы имеем набор эквидистантных вихревых пучков с одинаковым топологическим зарядом (ТЗ), равным заряду падающего пучка, во то время как во втором случае заряд линейно зависит от порядка дифракции. Следовательно, произвольные массивы ОВ с заданными ТЗ не могут быть сформированы с использованием периодических решёток. Обычно для этих целей используют метод компьютерных голограмм, который, однако, требует выполнения ряда итераций для получения подходящей голограммы.

Вышеупомянутые ограничения могут быть преодолены путём использования бинарных фазовых голограмм, рассчитываемых методом суперпозиции гармонических функций, в которых значения ВОР и ТЗ вводятся параметрически.

В настоящей работе сообщается об универсальном и неитеративном подходе к формированию массивов пучков ОВ с заданными ТЗ, пространственными частотами и относительной интенсивностью посредством синтеза бинарных фазовых голограмм. Обсуждается частный случай почти эквидистантного (квазирегулярного) массива ОВ с одинаковыми или произвольными ТЗ. Массивы структурированных световых пучков, содержащие наборы упорядоченных ОВ, продемонстрированы численно и экспериментально.

Список литературы

1. Yao A.M., Padgett M. J. // Adv. Opt. Photon. 2011. V. 3 (2). P. 161-204.
2. Gahagan K.T., Swartzlander G.A. // Opt. Lett. 1996. V. 21 (11). P. 827-829.
3. Mirhosseini M., Magaña-Loaiza O.S., et. al. // New Journal of Physics. 2015. V. 17 (3) P. 033033.
4. Willig K.I., Rizzoli S.O., et. al. // Nature. 2006. V. 440 (7086). P. 935-939.
5. Fu S., Zhai Y., et. al. // Opt. Lett. 2019. V.44 (19). P. 4753-4756.
6. Fu S., Zhai Y., et. al. // Opt. Express. 2019. V. 27 (23). P. 33111-33119.
7. Wei G.-X., Lu L.-L., et. al. // Optics Communications. 2009. V. 282 (14). P.2665-2669.
8. Rubinsztein-Dunlop H., Forbes A., et. al. // Journal of Optics. 2016. V. 19 (1). P. 013001.
9. Curtis E., Koss B.A., et. al. // Optics Communications. 2002. V. 207 (1). P. 169-175.

Н.А. КУЗЬМИН, Ю.Д. АРАПОВ

¹*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики
им. Н.Л. Духова, Москва*

²*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

ПОРОГОВАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ ЧАСТИЦ ПРИ ГОЛОГРАФИЧЕСКОМ ВОССТАНОВЛЕНИИ МУЛЬТИДИСПЕРСНЫХ СРЕД

Представлены результаты расчётных экспериментов, направленных на определение критерия пороговой концентрации частиц при моделировании голографического восстановления мультимедийных сред. Полученная информация в дальнейшем будет использоваться при постановке натурных экспериментальных исследований, результаты которых требуются для проведения анализа параметров мультимедийных сред в газодинамических экспериментах при помощи голографических методов и глубокого обучения нейронных сетей для распознавания характеристик частиц.

N.A. KUZMIN, Yu.D. ARAPOV

¹*N.L. Dukhov All-Russian Scientific Research Institute of Automatics, Moscow*

²*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*

THRESHOLD PARTICLES CONCENTRATION IN MULTI-DISPERSED MEDIA HOLOGRAPHIC RESTORATION

Simulation results aimed at determining recognition criterion and threshold particles concentration in multi-dispersed media are presented. The information obtained will be used for real experiments which results are required for analyzing the multi-dispersed media parameters in gas-dynamics experiments using holographic methods and neural network technologies.

Анализ распределения микрочастиц в аэрозолях представляет особый интерес для многих научных сфер, таких как газодинамика, медицина, экология, астрофизика [1]. Но существует ряд проблем, который затрудняет продвижение науки в данной области, например, сложность определения положения и размера частиц в плотных мультимедийных образованиях на пределе чувствительности методов регистрации. Для решения этой проблемы предлагается использовать нейросетевые технологии, что ускорит процесс детектирования в несколько сотен (или даже тысяч) раз за счёт автоматизации процесса. Использование нейронной сети в реальном эксперименте потребует создание базы

данных, на основе которой можно будет выполнить обучение, проверку и валидацию нейронной сети, вследствие чего возможно получить информацию, требуемую для обоснования результатов. Для создания базы данных требуется определить пороговое значение концентрации частиц [1], при котором их ещё возможно распознать.

В расчётных экспериментах использовалась схема и модель, указанные на рис. 1 и 2 соответственно. Эксперименты проводились при трёх различных значениях длины волны источника – 266, 532 и 1064 нм. Модель частиц состоит из 8 слоёв, каждый слой имитирует дискретное нормальное распределение количества частиц от их размера – использовались частицы с размерами 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 и 40 мкм.

Критерий восстановления частицы – физическая величина, связывающая возможность визуального определения размера и местоположения частицы с параметрами пучка света и модели частиц. В проведённых расчётных экспериментах был выбран критерий качественного восстановления частицы соответствующий минимальному значению контраста равному 0,2 [2]. По минимальному значению контраста, используя графический метод, стало возможным определение пороговой концентрации смоделированных частиц. Результаты определения значения пороговой концентрации представлены на рис. 2. Все расчёты проводились в программах Fresnel [3] и ImageJ [4].

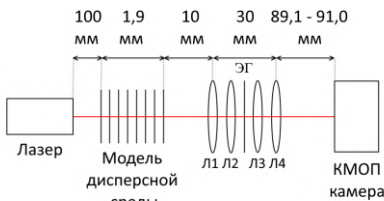


Рис. 1. Схема получения голограммы и её восстановления

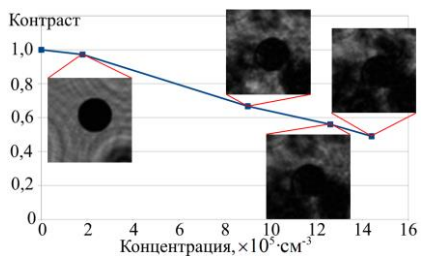


Рис. 2. График зависимости контраста от концентрации частиц размера 30 мкм при длине волны источника 266 нм

Список литературы

1. Arapov Yu.D., Dvornichenko M.E., et. al. // Optical Engineering. 2020. V. 59(10). P. 102420.
2. Кирилловский В.К. // Оптические измерения. Часть 4. Оценка качества оптического изображения и измерение его характеристик. СПб ГУ ИТМО, 2005.
3. Serov R., Malyutin A., et. al. // Fresnel. www.wavesimsoft.ru.
4. Wayne R. // ImageJ. National Institutes of Health. USA. <http://imagej.nih.gov/ij>.

А.В. ПАВЛОВ, А.О. ГАУГЕЛЬ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ПРОТИВОРЕЧИЙ МЕТОДОМ ГОЛОГРАФИИ ФУРЬЕ: ВЛИЯНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ НА ВЫБОР АЛЬТЕРНАТИВ

В развитие реализуемой кольцевой 6f схемой голографии Фурье модели принятия решений как выбора альтернатив, показано влияние фильтрации на оценку вариантов в противоречивых условиях. Теоретические результаты подтверждены моделированием антагонистической игры «Дилемма бандита».

A.V. PAVLOV, A.O. GAUGEL
ITMO University, Saint-Petersburg

MODELING OF DECISION MAKING BY FOURIER- HOLOGRAPHY TECHNIQUE: A ROLE OF FILTRATION

A model of decision making under contradictive information, implemented by 6f Fourier-holography circular setup, is developed by taking into account filtration on the both holograms: main rule “General Modus Ponens” and exclusion. Theoretical results are confirmed by modeling of the “Prisoner’s Dilemma” non-cooperative game.

Принятие решений (ПР), как выбор альтернатив, – классическая задача информационных технологий. Здесь обычно применяется аппарат теории игр: ПР в условиях неопределённости и противоречий моделируется на некооперативных играх, например, «Дилемме заключённого» (ДЗ). В [1] показано, что 6f схема голографии Фурье резонансной архитектуры рис. 1, нейрофизиологической концепции «кольца возбуждения» [2], адекватно моделирует процесс ПР в ДЗ, включая когнитивный диссонанс.

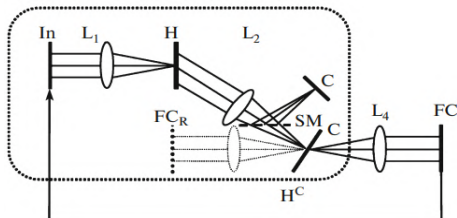


Рис. 1. 6f кольцевая схема голографии Фурье: L_1, L_2, L_3, L_4 – фурье-преобразующие линзы, H и H^C – голограммы основного правила и исключения, In и C – плоскости ввода и корреляций, SM – светоделитель, FC_R – эталон для записи голограммы H^C

В ДЗ игрок выбирает молчать или предать при условиях: а) решение подельника неизвестно; известно, что: б) подельник предал, в) подельник молчит. Натурные эксперименты [3] показали нарушение классических принципа определённости и теории вероятности. В контексте объяснения решения актуален вопрос свободы выбора: почему в рамках одной логики и в одинаковых условиях разные игроки принимают разные решения?

В [1] показана зависимость выбора от условий обучения – различий спектров амплитуд эталонов альтернатив, но фактор фильтрации детально исследован не был. В докладе даны аналитическая модель и численное подтверждение влияния фильтрации на голограммах на выбор решения.

На рис. 2 даны зависимости отношения полуширин спектров амплитуд образов «молчать» и «предать» V^{Stable} , при котором равновероятны оба решения, от радиуса автокорреляции эталона «молчать» r^{ACFRef} для ряда параметров фильтрации на голограмме Н, СКО численных результатов от аналитических σ . Рис. 3 иллюстрирует роль фильтрации на голограмме исключения Н^С, ослабляющей влияние фильтрации на голограмме Н.

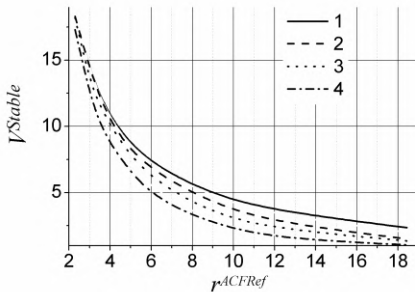


Рис. 2. Зависимости V^{Stable} от r^{ACFRef} для

R – отношений полуширин спектра эталона и фильтра на голограмме Н: 1 – $R = 0$, $\sigma = 0.035$; 2 – $R = 4$, $\sigma = 0.145$; 3 – $R = 6$, $\sigma = 0.163$; 4 – $R = 10$, $\sigma = 0.198$

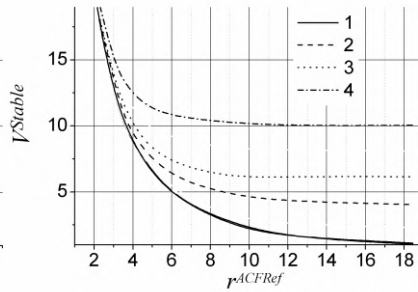


Рис. 3. Зависимости V^{Stable} от r^{ACFRef} для R^C –

отношений полуширин спектра эталона и фильтра на голограмме Н^С при $R = 10$: 1 – $R^C = 0$, $\sigma = 0.198$; 2 – $R^C = 4$, $\sigma = 0.148$; 3 – $R^C = 6$, $\sigma = 0.181$; 4 – $R^C = 10$, $\sigma = 0.112$

Рис. 2 и 3 показывают, что в рамках одной логики принятия решения, в одних и тех же условиях, выбор зависит от индивидуальных особенностей материального носителя логики игрока – фильтрации в его нейросети.

Список литературы

1. Pavlov A.V. // Computer Optics. 2021. V. 45(4). P. 551-561.
2. Иванецкий А.М. // Журнал высшей нервной деятельности. 1996. Т. 46. № 2. С. 241-252.
3. Tversky A, Shafir E. // Psychological Science. 1992. V. 3(5). P. 305-309.

А.А. КАЛИНИНА¹, А.Н. ПУТИЛИН

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

¹*Московский физико-технический институт*

(национальный исследовательский университет), Долгопрудный

ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОЧКОВ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ НА ОСНОВЕ КОМБИНАЦИИ ГОЛОГРАММ

В данной работе представлена схема формирования виртуального изображения с помощью комбинации осевой и внеосевой голограмм. Такая комбинация позволяет решить главную проблему при разработке устройств дополненной реальности – формирование виртуального изображения в широком поле зрения при большом выходном зрачке. Система имеет поле зрения 60 °, а зрачок 6 мм.

A.A. KALININA¹, A.N. PUTILIN

Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

¹*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny*

OPTICAL SYSTEM OF AR GLASSES BASED ON COMBINATION OF HOLOGRAMS

We present the optical system of augmented reality glasses based on combination of axial and off-axial holograms. This combination provide solution which satisfy both requirements for AR devices – wide field of view and large eyebox. Presented system has field of view 60 ° and eyebox size 6 mm.

Несмотря на высокие выходные характеристики, никто не использует осевые голограммы в очках дополненной реальности [1]. Главная причина – неудобное расположение источника изображения в таких системах. Поскольку осевая голограмма и источник изображения должны находиться на одной оси – источник изображения должен располагаться прямо перед глазом пользователя, так же, как и голограмма. Данное условия предъявляет высокие требования к источнику изображения: он должен быть прозрачный, иметь малую толщину, обладать узким спектром излучения и иметь подходящую апертуру излучения. Под эти требования подходит только голограмма.

В этой работе мы представляем систему очков дополненной реальности, принцип работы которой основан на комбинации двух голограмм. Одна голограмма – осевая – осуществляет преобразование сферических пучков, исходящих от источника изображения, в плоские,

заполняющие выходной зрачок системы и формирующие виртуальное изображение на бесконечности. Вторая голограмма – внеосевая – выполняет функцию источника изображения и осуществляет перенаправление излучения от дисплея как указано на рис. 1. Особенностью такой схемы является формирование широкого выходного зрачка при широком поле зрения.

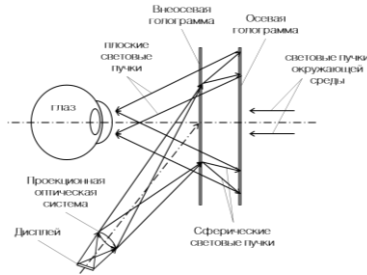


Рис. 1. Оптическая система очков дополненной реальности на основе комбинации осевой и внеосевой голограмм

Ключевым элементом в этой схеме является осевая голограмма, которая записывается по методу Денисюка, при этом конструктивные точки объектной и опорной волны расположены на расстояниях L_O и L_R соответственно (рис. 2). Восстановление голограммы происходит сферическими пучками из плоскости промежуточного изображения, расположенной на расстоянии L_i от голограммы (рис. 3). Промежуточное изображение – плоскость, в которой фокусируются лучи при восстановлении голограммы плоскими пучками из положения выходного зрачка с расстояния L_O . Форма и положение промежуточного изображения зависят от положения конструктивных точек записи, при этом в нашей схеме, промежуточное изображение – плоское. Представленная схема обладает широким полем зрения 60° , выходным зрачком 6 мм, степенью прозрачности $> 90\%$ и однородностью виртуального изображения $> 80\%$.

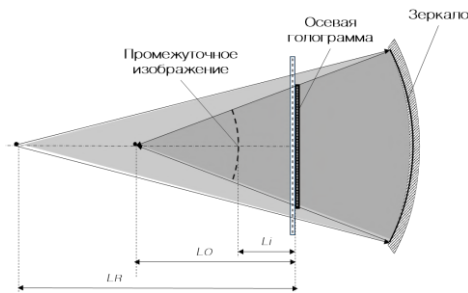


Рис. 2. Схема записи осевой голограммы

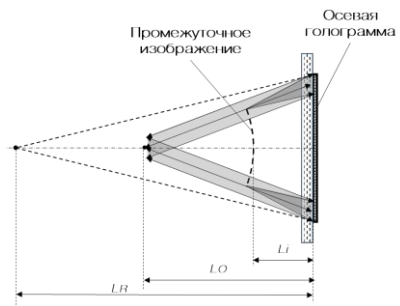


Рис. 3. Схема восстановления осевой голограммы

Список литературы

1. Kim N., Piao Y.-L., Wu H.-Y. // Holographic Materials and Optical Systems. 2017. P. 99-132.

О.Л. АФАНАСЬЕВА

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ КОЛЛИМАТОРНЫЙ ПРИЦЕЛ НА ОСНОВЕ ВОЛНОВОДА

В данной работе предложена реализация коллиматорного прицела на основе голографического волновода с дифракционными решётками для ввода и вывода излучения. Предложена схема расположения дифракционных решёток на поверхности голографического волновода, реализующая принцип увеличения размера выходного зрачка, а также приведены результаты исследований его основных параметров и анализ возможности обеспечения термокомпенсации данной схемы.

O.L. AFANASEVA

Bauman Moscow State Technical University

HOLOGRAPHIC COLLIMATOR SIGHT BASED ON A WAVEGUIDE

In this research, the implementation of a collimator sight based on a holographic waveguide with diffraction gratings for the input and output of radiation is proposed. A scheme for the arrangement of diffraction gratings on the surface of a holographic waveguide, which implements the principle of increasing the size of the exit pupil, is proposed, and the results of studies of its main parameters and an analysis of the possibility of providing thermal compensation for this scheme are presented.

Голографические волноводы в настоящее время используются в миниатюрных системах отображения информации, дополненной реальности, а также в авиационных коллиматорных индикаторах, благодаря обеспечению минимальных габаритных размеров и возможности увеличения размеров выходного зрачка [1, 2]. Исследования по применению таких голографических волноводов в коллиматорных прицелах показали возможность применения, отдельные преимущества и перспективность данной реализации [3, 4]. Однако описание принципов построения коллиматорных прицелов на основе голографических волноводов, методов их расчёта, технологии изготовления и копирования, а также решение вопросов термокомпенсации [5], повышения дифракционной эффективности и минимизации демаскирующих факторов является актуальной задачей [6].

Такая реализация прицела позволяет значительно уменьшить его габаритные размеры за счёт распространения излучения внутри тонкой стеклянной пластины волновода [3]. Поперечные габариты прицела также уменьшаются, так как уменьшается световой диаметр (до величины 5 - 6 мм) и фокусное расстояние объектива. При этом, благодаря голографическому волноводу, выходной зрачок составляет не менее 25 мм.

В данной работе предложено математическое описание основных параметров голографического волновода, по которым разработана схема голографического коллиматорного прицела на основе волновода, представляющего собой плоскопараллельную пластину из стекла марки БК6 (показатель преломления $n = 1,5421$) с нанесёнными на её поверхность дифракционными решётками [4].

Проведено исследование вариантов реализации структуры волновода с точки зрения геометрии расположения дифракционных решёток, их периодов и ориентации. При этом в данной работе рассматриваются рельефно-фазовые решётки, для которых возможны варианты серийного копирования и тиражирования. Осуществлён выбор оптимального варианта структуры волновода. Рассмотрены вопросы возможности обеспечения термокомпенсации схемы прицела на основе волновода при изменении длины волны источника излучения в результате изменения температуры окружающей среды. Предложены рекомендации по минимизации обратного блика излучения, являющегося демаскирующим фактором коллиматорного прицела. Рассмотрены вопросы повышения дифракционной эффективности рельефно-фазовых решёток при вводе оптического излучения в голографический волновод.

Список литературы

1. Одинокоев С.Б., Маркин В.В., Лушников Д.С., Кузнецов А.С., Соломашенко А.Б., Дроздова Е.А. Оптическая схема получения голографического индикатора для отображения знаково-символьной информации, 2012.
2. Betin A.Y., Dontchenko S.S., Kovalev M.S., Odiнокоев S.B., Solomashenko A.B., Zlokazov E.Y. A combination of computer-generated fourier holograms and light guide substrate with diffractive optical elements for optical display and sighting system. 2015.
3. Корешев С.Н., Шевцов М.К. Голографический прицел световодного типа с синтезированным зрачком. Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 2018.
4. Grad Y.A., Nikolaev V.V., Odiнокоев S.B., Solomashenko A.B., Yanev A.S. Analysis of light-guide parameters for multicolor augmented reality indicator based on DOE. 2018.
5. Odiнокоев S.B., Sagatelyan H.R., Bugorkov K.N., Popov V.V. The possibilities of the plasma etching of optical glass to create a functional micro-relief // Контенант. 2018. № 3. С. 78.
6. Miller J., Beaucoudrey N., Chavel P., Turunen J., Cambil E. Design and fabrication of binary slanted surface-relief gratings for a planar optical interconnection. 1997.

Н.А. ПУТИЛИН², С.Е. ДУБЫНИН^{1,3}, А.Н. ПУТИЛИН¹,
С.С. КОПЕНКИН¹, Ю.П. БОРОДИН¹

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

²Московский государственный университет геодезии и картографии «МИИГАиК»

³Исследовательский центр «Самсунг», Москва

ИСКАЖЕНИЯ ЗАПИСИ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ БИМ-КОМБАЙНЕРОВ ДЛЯ ДИСПЛЕЕВ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ

В данной работе представлено исследование искажений волновых фронтов при записи и воспроизведении голографических широкоапертурных линз для бим-комбайнеров дисплеев дополненной реальности. Исследуемые голографические линзы имеют исключительно большой диапазон пространственных частот – от 0.33 до 4 мкм и рабочую угловую апертуру до 90 °, при этом возникают значительные искажения в виртуальном изображении, что ограничивает выходной зрачок дисплея.

N.A. PUTILIN², S.Ye. DUBYNIN^{1,3}, A.N. PUTILIN¹,
S.S. KOPENKIN¹, Yu.P. BORODIN¹

¹Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

²Moscow State University of Geodesy and Cartography "MIIGAiK"

³Samsung Research and Designed Institute Russia, Moscow

DISTORTION OF RECORDING AND RECONSTRUCTION OF HOLOGRAPHIC BEAM-COMBINERS FOR AUGMENTED REALITY DISPLAYS

This paper presents a study of wavefront distortions during recording and reconstruction of holographic wide-aperture lenses for augmented reality display beam combiners. The investigated holographic lenses have an extremely wide range of spatial frequencies – from 0.33 to 4 μm and the working angular aperture up to 90 °, while significant distortions appear in the virtual image, which limits the exit pupil of the display.

Одним из ключевых элементов оптических схем дисплеев дополненной (AR) и смешанной (MR) реальности являются оптические элементы совмещения реального и виртуального изображения – бим-комбайнеры (beam-combiners – BC), поэтому исследования в этой области стали очень актуальными в последнее время [1, 2].

В этой работе мы рассмотрели искажения, возникающие при записи голографических широкоапертурных отражательных линз являющихся самыми эффективными ВС, к тому же они практически не искажают наблюдение внешней обстановки зрителем, использующим AR дисплей. Рассмотрим схему записи таких линз (рис. 1) сходящимся опорным и расходящимся предметным пучками. Обычно считается, что если воспроизводить такую голограмму комплексно-сопряжённым пучком, то можно восстановить неискажённый предметный луч, однако при таких углах падения опорного луча, какие использовались в наших экспериментах – средний угол 60° , диапазон углов порядка 24° , лучи приобретают большие искажения при переходе границы регистрирующей среды (РС) с воздухом (на вставке рис. 1 справа показан вид этих искажений), аналогичные искажения приобретает и предметный луч, а поскольку его угловая апертура может достигать 90° , то искажения тоже очень большие.

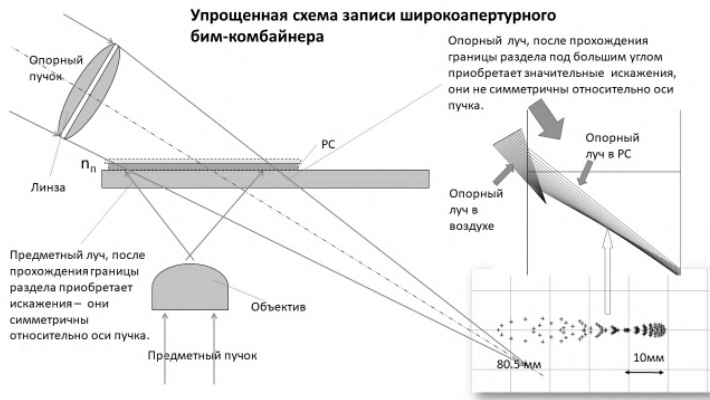


Рис. 1. Схема записи широкоапертурного бим-комбайнера

Таким образом, на голограмме записываются сильно искажённые волновые фронты и эти искажения, только частично компенсируются при воспроизведении. Были проведены модельные расчёты и эксперименты по записи такого вида голограмм для детального анализа такого типа искажений.

Список литературы

1. Rolland J., Cakmakci O. Head-worn displays: the future through new eyes // Optics and Photonics News. 2009. V. 20. No. 4. P. 20-27.
2. Xiong J., et al. Holographic optical elements for augmented reality: principles, present status, and future perspectives // Advanced Photonics Research. 2021. V. 2. No. 1. P. 2000049.

А.В. БЕЛАШОВ, А.А. ЖИХОРЕВА, Д.М. БЕЛТЮКОВА,
И.К. ЛИТВИНОВ¹, А.В. САЛОВА¹, Т.Н. БЕЛЯЕВА¹,
Е.С. КОРНИЛОВА¹, И.В. СЕМЕНОВА, О.С. ВАСЮТИНСКИЙ

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

¹Институт цитологии РАН, Санкт-Петербург

КОМБИНИРОВАННЫЙ МОНИТОРИНГ КЛЕТОК С ПОМОЩЬЮ ФЛУОРЕСЦЕНТНОЙ И ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ВНУТРИКЛЕТОЧНОГО НАКОПЛЕНИЯ ФОТОСЕНСИБИЛИЗАТОРА РАДАХЛОРИН

В работе представлены результаты совместного анализа распределений показателя преломления и интенсивности флуоресценции фотосенсибилизатора Радахлорин в клетках нескольких стандартных линий. Благодаря данным полученным с помощью голографической томографии была исследована зависимость количества накопленного фотосенсибилизатора от объема клеток, а также продемонстрировано его преимущественное накопление во внутриклеточных структурах с высоким содержанием белка.

A.V. BELASHOV, A.A. ZHIKHOREVA, D.M. BELTYUKOVA,
I.K. LITVINOV¹, A.V. SALOVA¹, T.N. BELYAEVA¹,
E.S. KORNILOVA¹, I.V. SEMENOVA, O.S. VASYUTINSKII

Ioffe Institute of the RAS, Saint-Petersburg

¹Institute of Cytology of the RAS, Saint-Petersburg

ANALYSIS OF INTRACELLULAR RADACHLORIN ACCUMULATION USING THE COMBINATION OF FLUORESCENCE AND HOLOGRAPHIC MICROSCOPES

We present the results of a joint analysis of the distributions of the refractive index and fluorescence intensity of the photosensitizer Radachlorin in cells of several standard lines. The dependence of photosensitizer fluorescence intensity on the volume of living cells was investigated, and predominant accumulation of the photosensitizer in intracellular structures with a high protein content was demonstrated.

В наши дни все больше научных работ в области цитологии и биофизики опирается на методы мультимодальной микроскопии, предполагающие проведение одновременного анализа нескольких характеристик живых клеток, полученных с помощью разных методов анализа биологических образцов. Среди таких методов можно отметить

как инвазивные подходы, требующие специальной подготовки образцов, так и методы неинвазивного длительного мониторинга живых клеток. Одна из групп таких низкоинвазивных методов основана на визуализации контраста распределения показателя преломления клеток и позволяет определять количественные параметры биологических объектов с минимальным воздействием на клеточные структуры. Методы голографической микроскопии и томографии неоднократно применялись для детектирования особенностей морфологии клеток, анализа подвижности биологических объектов и исследования процесса их гибели [1, 2]. В настоящей работе мы представляем результаты совместного анализа трёхмерных распределений показателя преломления клеток и их флуоресцентных изображений для исследований особенности накопления фотосенсибилизатора Радахлорин в клетках.

Был проведён мониторинг нескольких десятков клеток с помощью метода голографической томографии для определения их объёма. Анализ флуоресцентных изображений тех же самых групп клеток позволил оценить относительное количество Радахлорина, накопленного в ходе 24 часов инкубации в растворе фотосенсибилизатора. Были построены графики, отображающие корреляцию между объёмом клеток и суммарной интенсивности сигнала флуоресценции фотосенсибилизатора. Анализ полученных данных продемонстрировал, что вариация накопленного клетками Радахлорина не может объясняться разницей в их объёме, что косвенно свидетельствует о неравномерности распределения фотосенсибилизатора в клетке. Было отмечено, что Радахлорин преимущественно накапливается в окооядерных областях клеток, обладающих высоким показателем преломления и градиентом показателя преломления, что также подтверждает специфичность Радахлорина к определённым внутриклеточным структурам. Эксперименты были проведены на трёх HeLa, A549 и 3T3 клеточных линиях и продемонстрировали схожие результаты для клеток различной степени онкогенности и разных типов тканей. Таким образом, совместный анализ флуоресцентных изображений живых клеток и трёхмерных распределений показателя преломления при накоплении ими флуорофора позволяет получить дополнительную информацию о локализации фотосенсибилизатора в клетках.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 21-72-10044.

Список литературы

1. Yi F., Moon I., Javidi B. // Biomedical optics express. 2016. V. 7. № 6. P. 2385-2399.
2. Yu X., et al. // Journal of biomedical optics. 2014. V. 19. № 4. P. 045001.

А.В. КРАЙСКИЙ, Т.В. МИРОНОВА
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СДВИГА ОБЪЕКТА С СУБМИКРОННОЙ ТОЧНОСТЬЮ С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВОГО ФОТОАППАРАТА

Приведены результаты измерений малых смещений с помощью корреляционного сканирования пар изображений. Показано, что при усреднении по площади порядка 1 см^2 сдвиги порядка 10 - 100 мкм можно измерять с точностью до 0.25 мкм.

A.V. KRAISKY, T.V. MIRONOVA
Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

DETERMINATION OF OBJECT SHIFT WITH SUBMICRON ACCURACY USING A DIGITAL CAMERA

The results of measurements of small displacements by correlation scanning of pairs of images are presented. It has been shown that, when averaged over an area of the order of 1 cm^2 , shifts of the order of 10 - 100 μm can be measured with an accuracy of 0.25 μm .

Цифровые фотокамеры помимо обычного бытового использования широко применяются как в системах компьютерного зрения, так и для различного рода измерений. Это и геометрические измерения (сдвиги, углы, расстояния), и колориметрические измерения, а также пространственные распределения интенсивности света [1].

Целью работы является выявление минимальных сдвигов, доступных для измерений с помощью одного только фотоаппарата без использования дополнительных оптических приспособлений (например, микроскопа).

В работе используется корреляционный метод, который позволяет регистрировать субпиксельные смещения. [1, 2]. При обработке двух изображений – исходного и смещённого – он даёт направление и величину смещения для каждой точки объекта.

Проводилось два типа экспериментов. Первый – выявление отклонений от плоскостности объекта. Два листа бумаги с напечатанной на них случайной структурой, зажимались между двумя стёклами. В верхнем листе вырезано отверстие, что даёт изменение глубины 100 мкм (толщина бумаги). Делалось два снимка (под углом $\sim 45^\circ$, слева и справа),

которые, после компенсации проективных искажений и точного совмещения по четырём точкам из областей, соответствующих верхнему листу, обрабатывались корреляционным методом. В результате корреляционного сканирования получалась карта взаимных смещений двух изображений, нулевые значения которой соответствовали верхнему слою, а точки со смещением показывали форму и глубину отверстия в верхнем листе. При выбранной геометрии съёмки (расстояние до объекта ~ 40 см, углы 45°) взаимное смещение составляло 3.3 пикселя, при усреднении измерений по области, охватывающей около 3000 пикселей, стандартное отклонение 0.06 пикселя, доверительный интервал 0.0021 пикселя, или, в пересчёте в реальные размеры, 0,063 мкм. Аналогичная геометрия съёмки и процедура обработки кадров использовалась при измерении смещений. Плоский объект смещался в трёх взаимно перпендикулярных направлениях с шагом 10 мкм в неподвижном окружении. Масштаб изображения – 20 пиксель/мм. Сдвиг 10 мкм в направлении, перпендикулярном оси камеры, соответствует 0,2 пикселя, стандартное отклонение 0,005 пикселя (0,25 мкм в реальных единицах). Преимущество предлагаемого способа корреляционной обработки по протяжённой площади состоит в высокой точности измерений (малой величине доверительного интервала σ). Поэтому при достаточно протяжённой области объекта 100×100 элементов (около 1×1 см), объём выборки измерений N составляет около 10000. Оценка доверительного интервала σ даёт $\sigma = t_{1-p/2} \sigma_0 / \sqrt{N}$, где стандартное отклонение σ_0 , p – уровень значимости, $t_{1-p/2}$ – квантиль распределения Стьюдента (составляющий для уровня значимости $p = 0.05$ для больших N – 1.96), т.е. оценка доверительного интервала отклонения меньше стандартного отклонения практически на два порядка.

Список литературы

1. Mironova T.V., Kraiski A.V. How to Use a Digital Camera as a Metering Device, Spotlight // SPIE Press. 2016. V. SL22. doi: <http://dx.doi.org/10.1117/3.2256725>
2. Боркова В.Н., Крайский А.В., Миронова Т.В., Султанов Т.Т. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2006. № 7. С. 38-41.

А.Ю. ПОРОЙКОВ, А.Ю. МАРЧЕНКОВ,
М.О. ШАРИКОВА¹, Д.Д. ХОХЛОВ¹

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

¹Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ДЕФОРМАЦИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Приведены результаты лабораторных экспериментов по измерению деформаций элементов железнодорожного транспорта при статических и динамических нагрузках с применением метода корреляции цифровых изображений. Показано, что применение метода позволяет выявлять и оценивать линейные размеры дефектов, возникающих в образцах, и оценивать распределение деформаций при их нагружении.

A.Yu. POROYKOV, A.Yu. MARCHENKOV,
M.O. SHARIKOVA¹, D.D. HOHLOV¹

National Research University "Moscow Power Engineering Institute"

¹Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow

OPTICAL DIAGNOSTICS OF DEFORMATIONS OF RAILWAY TRANSPORT ELEMENTS

The results of laboratory experiments on measuring the deformations of railway transport elements under static and dynamic loads using the digital image correlation method are presented. It is shown that the application of the method makes it possible to identify and evaluate the linear dimensions of defects arising in the samples, and to estimate the distribution of deformations during their loading.

Безопасность железнодорожных перевозок, в том числе пассажирских, во многом зависит от своевременной диагностики состояния железнодорожной инфраструктуры. Усталостные изломы ответственных деталей подвижного состава таких, как железнодорожные рельсы, являются одним из основных факторов схода поездов. Пропуски дефектов могут происходить в связи с большим разнообразием геометрических форм и размеров контролируемых элементов и достаточно низкой чувствительностью методов контроля к выявлению неблагоприятно расположенных трещиноподобных дефектов.

В работе для измерения деформации испытуемых образцов и выявления в них трещин применялся метод корреляции цифровых

изображений, в англоязычной литературе – Digital Image Correlation (DIC) [1, 2]. Он основан на цифровой обработке изображений поверхности деформируемого образца. Изображения поверхности регистрируются с помощью видеокамеры. Далее изображения разбиваются на небольшие участки, для которых происходит отслеживание их движения на изображениях, полученных при различных нагрузках. Смещения участков позволяют оценить деформации, происходящие с поверхностью, и таким образом и со всем образцом. Одним из наиболее распространённых подходов в методе DIC является алгоритм LSM (Least Squares Matching). Он заключается в подборе параметров аффинного преобразования исходного участка изображения для максимального совпадения с участком на изображении с нагружением.

Испытания образцов были проведены на испытательных машинах Instron 8801 и Instron 5982. Для подготовки образцов были использованы различные элементы железнодорожного транспорта, изготовленные из различных материалов: рельсы, элементы колесной пары и подвески подвижного состава. Испытания проводились на сжатие, растяжение и изгиб, в зависимости от образца.

Экспериментальные исследования проводились с помощью измерительной системы LaVision StrainMaster, состоящей из двух видеокамер Imager SX для определения трёхмерных деформаций, устройства синхронизации LaVision PTU и персонального компьютера с программным обеспечением DaVis 8.4. Во время испытания проводилась регистрация изображений поверхности образца. Для повышения контрастности исследуемой поверхности и улучшения результатов измерения на неё наносился случайный рисунок с помощью аэрозольных красок белого и чёрного цвета. Далее изображения обрабатывались с помощью метода (DIC).

В работе были получены результаты лабораторных испытаний различных элементов железнодорожного транспорта с применением метода DIC. Показано, что применение метода DIC позволяет достаточно точно выявлять и оценивать линейные размеры дефектов, возникающих в образцах, и оценивать распределение деформаций при их нагружении.

Данная работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект 20-38-51019).

Список литературы

1. Keating T.J., Wolf P.R., Scarpace F.L. // Photogrammetric engineering and remote sensing. 1975. V. 41. P. 993-1002.
2. Sutton M.A., Orteu J.J., Schreier H.W. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. Basic Concepts, Theory and Applications. 2009.

З.А. ПИНАЕВ, М.А. ВОЛЫНСКИЙ

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ СОПОСТАВЛЕНИЯ ПЛОТНЫХ ВОКСЕЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ЗАДАЧ ОПТИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ

Приведены результаты экспериментов по сопоставлению и совмещению частей объекта в плотном воксельном пространстве с помощью трёхмерного алгоритма SIFT. Определены максимально допустимый угол поворота частей объекта в пространстве относительно друг друга, оптимальный размер области перекрытия частей объекта и погрешность сопоставления.

Z.A. PINAEV, M.A. VOLYNSKY

ITMO University, Saint-Petersburg

RESEARCH OF METHODS FOR MATCHING DENSE VOXEL DATA FOR OPTICAL TOMOGRAPHY PROBLEMS

The results of experiments on matching and aligning parts of an object in a dense voxel space using the three-dimensional SIFT algorithm are presented. The maximum valid angle of rotation of the object parts in space relative to each other, the optimal size of the overlapping area of the object parts, and the comparison error are determined.

Оптическая когерентная томография (ОКТ) – перспективный метод анализа состояния предметов живописи при их реставрации [1]. Для таких задач актуально исследование объектов по площади, значительно превышающей поле зрения систем ОКТ. Это достигается последовательным сканированием объектов в латеральной плоскости, что ставит задачу корректного объединения фрагментов объекта с учётом сдвигов, поворотов и наложения частей объекта друг на друга.

Цель работы – исследование трёхмерного алгоритма SIFT [2, 3], как метода сопоставления частей объекта, представляемых в качестве плотных воксельных данных, для задач оптической томографии.

Использование в работе алгоритма SIFT позволяет получить необходимую информацию для аффинного преобразования, а также координат точек интереса и их дескрипторов. В свою очередь, аффинное преобразование используется в работе для корректирования угла поворота частей объекта в пространстве относительно друг друга, а точки интереса и дескрипторы – для определения области перекрытия частей объекта и их

линейного сдвига по осям относительно друг друга. На рис. 1 приведён результат совмещения в воксельном пространстве, на котором отмечены границы исходных частей и область их пересечения.

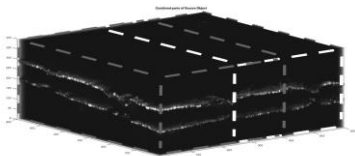


Рис. 1. Результат совмещения в воксельном пространстве (тёмно-серым пунктиром обозначены границы первой части, светло-серым – второй)

В ходе работы проведены исследования зависимости качества совмещения частей объекта в воксельном пространстве от области пересечения частей и угла поворота одной части относительно другой. В результате, дисперсия разности исходного и восстановленного объектов (по интенсивности) в ходе экспериментов находилась в интервале 0,08 - 0,25 %. При этом значения дисперсии более 0,18 % наблюдались только в экспериментах с поворотом одной части объекта по одной оси на 5° , что для рассматриваемой задачи считается большим углом. Погрешность оценки линейного сдвига частей объекта в ходе экспериментов находилась в интервале 0,2 - 2 вокселя, при этом значения погрешности более 0,9 вокселя наблюдались с увеличением угла поворота. Также, выявлено, что при увеличении области перекрытия частей объекта увеличивается и количество найденных точек интереса. Однако, по результатам экспериментов, увеличение количества точек интереса не влияло на качество совмещения. Установлено, что оптимальным размером области перекрытия является 15 %. Меньшие значения не позволяют алгоритму найти достаточное количество точек интереса, а при больших – не наблюдается значительное увеличение точности совмещения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 19-79-10118).

Список литературы

1. Iwanicka M., Sylwestrzak M., Targowski P. Optical coherence tomography for examination of artworks // *Advanced Characterization Techniques, Diagnostic Tools and Evaluation Methods in Heritage Science*. 2018. P. 49-59.
2. Flitton G., Breckon T.P., Megherbi N. Object recognition using 3D SIFT in complex CT volumes // *British Machine Vision Conference. BMVC 2010 Proceedings*. 2010. P. 4-7.
3. Rister B., Horowitz M.A., Rubin D.L. Volumetric image registration from invariant keypoints // *IEEE Transactions on Image Processing*. 2017. V. 26. No. 10. P. 3-10.

С.В. ВАСИЛЬЕВ, А.В. БОГОСЛОВСКИЙ, И.В. ЖИГУЛИНА,
Д.А. ДЕРБУШ

*Военный учебный научный центр ВВС «Военно-воздушная академия
им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж*

ВЫЯВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ-ЛИНИЙ НА ДВУМЕРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Изложены основные результаты исследований фазоэнергетических функций тестовых изображений с движущимся на них строго горизонтально объектом-линией. Определены аналитические выражения для указанных функций и представлен их анализ по характерным областям фаз.

S.V. VASILYEV, A.V. BOGOSLOVSKIY, I.V. ZHIGULINA,
D.A. DERBUSH

*Military Training and Research Center of the Air Force Academy
named after professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin», Voronezh*

DETECTING THE MOVEMENT OF LINE OBJECTS IN TWO-DIMENSIONAL IMAGES

The main results of studies of phase-energy functions of test images with a strictly horizontal object-line moving on them are presented. Analytical expressions for these functions are defined and their analysis by characteristic regions of phases is presented.

В работах [1, 2] были исследованы энергетические характеристики видеопоследовательности (ЭХ), в частности, введены понятия энергетической функции $\Delta\sigma(k)$ и фазоэнергетической функции $\Delta\varphi(k)$.

Приведённые в этих работах результаты анализа полученных зависимостей указали на возможность использования ЭФ для идентификации движения при обработке видеопоследовательностей. Показано наличие десяти характерных областей изменения фазы k и их связь с пространственным положением объекта в кадрах, следующих друг за другом. Представленные результаты построчной обработки рассматривались в одномерном пространстве, однако, авторами упомянута возможность описывать движение объекта и в двумерном пространстве, осуществляя обработку в т.ч. и по столбцам.

В работе [3] фазоэнергетическая характеристика (ФЭХ) изображения представлена в виде дискретного векторного поля

$$\bar{I}(p_x, p_y) = \{I_x(p_x, p_y), I_y(p_x, p_y)\}, p_x, p_y.$$

При решении задачи определения параметров движения объекта представляет интерес рассмотреть разности соответствующих компонент $I_x(p_x, p_y)$ и $I_y(p_x, p_y)$ следующих друг за другом кадров, т.е. фазоэнергетические функции

$$\Delta I_x(p_x, p_y) = I_x^*(p_x, p_y) - I_x'(p_x, p_y),$$

$$\Delta I_y(p_x, p_y) = I_y^*(p_x, p_y) - I_y'(p_x, p_y).$$

Переход к двумерному случаю демонстрирует более сложную картину зависимостей ФЭХ и требует его отдельного описания.

Анализ движения объекта (-ов) с помощью фазоэнергетических характеристик на реальных изображениях достаточно сложен, поэтому представляется разумным рассмотреть отдельно строго горизонтальное, вертикальное движение и движение по диагонали. Результаты проведённого исследования таких изолированных перемещений получены для объекта, расположенного в области центра правого верхнего квадранта изображения.

В [4] было показано, что для определённого случая расположения объекта в кадре видеопоследовательности поведение фазоэнергетической функции двумерного изображения полностью совпадает с ФЭФ $\Delta\varphi(k)$ изображения-строки. Стоит полагать, что положение объекта, имеющего ненулевую вертикальную координату, будет характеризоваться наличием некоторых отличительных признаков в $\Delta I_x(p_x, p_y)$ и $\Delta I_y(p_x, p_y)$. Представленные результаты моделирования направлены именно на выявление таких особенностей.

Список литературы

1. Богословский А.В., Сухарев В.А., Жигулина И.В. Обнаружение периодического или квазипериодического движения при обработке видеопоследовательностей // Радиотехника. 2018. № 11. С. 5-10.
2. Богословский А.В., Сухарев В.А., Жигулина И.В. Векторное поле фазоэнергетического спектра изображения и видеопоследовательности // Радиотехника. 2018. № 11. С. 11-15.
3. Богословский А.В., Сухарев В.А., Жигулина И.В., Пантюхин М.А. Векторные поля, порождаемые преобразованием Фурье видеосигналом изображений // Радиотехника. 2021. № 7. С. 127-139.
4. Богословский А.В., Жигулина И.В., Маслов И.С. Методы обработки видеопоследовательностей на основе анализа энергетических параметров видеосигнала изображения // Радиотехника. 2015. № 4. С. 112-119.

М.А. ВОЛЫНСКИЙ¹, В.Г. ГЕНДИН¹, Е.С. ГЛАДКОВА²,
И.П. ГУРОВ¹, Н.Б. МАРГАРЯНЦ¹, С.В. СИРРО^{1,2}, П.С. СКАКОВ¹

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург

²Государственный Русский музей, Санкт-Петербург

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ СЛОИСТО-НЕОДНОРОДНОЙ МИКРОСТРУКТУРЫ ПРЕДМЕТОВ ИКОНОПИСИ

Методом оптической когерентной томографии во временной области исследованы объекты изобразительного искусства, созданные с использованием традиционных древнерусских техник темперной иконописи. Приведены результаты визуализации многослойной структуры поверхностного слоя фрагментов живописи (структуры лакового покрытия и современных минеральных пигментов). Полученные результаты имеют важное значение для понимания техники иконописи и решения реставрационных задач.

M.A. VOLYNSKY¹, V.G. GENDIN¹, E.S. GLADKOVA², I.P. GUROV¹,
N.B. MARGARYANTS¹, S.V. SIRRO^{1,2}, P.S. SKAKOV¹

¹ITMO University, Saint-Petersburg

²State Russian Museum, Saint-Petersburg

APPLYING THE OPTICAL COHERENCE TOMOGRAPHY FOR VISUALIZATION OF ICON PAINTING OBJECTS WITH LAYERED-INHOMOGENEOUS MICROSTRUCTURE

Time domain optical coherence tomography is used to study visual art objects created using traditional Old Russian techniques of tempera icon painting. Visualized results of the multilayer structure of the painting fragments surface layer (the structure of the lacquer coating and modern mineral pigments) are presented. The obtained results are important for understanding the technique of icon painting and solving restoration problems.

Применение оптической когерентной томографии (ОКТ) для исследования объектов живописи обусловлено высоким разрешением метода, неинвазивностью исследований и возможностью получения 3D-изображений слоевой структуры поверхностного слоя [1]. Для решения задач реставрации объектов темперной иконописи предлагается использовать тестовый образец, выполненный в традиционной технике

написания икон с применением современных пигментов и лака. Для исследования многослойной структуры тест-объекта применена корреляционная система ОКТ (рис. 1), обеспечивающая высокое аксиальное разрешение (до 3.4 мкм) с использованием высокоскоростной обработки данных [2]. На рис. 2 приведён один из фрагментов изображения тест-объекта с выделенным участком интереса.

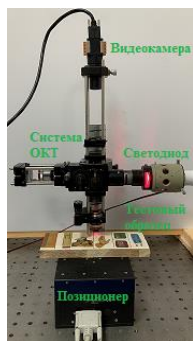


Рис. 1. Фотография экспериментальной установки

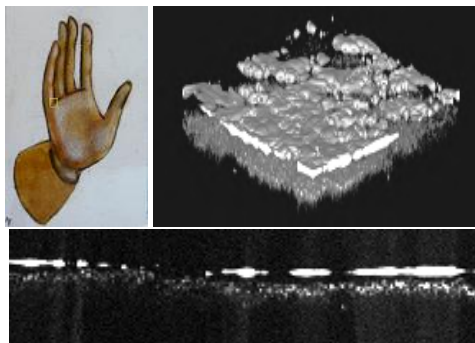


Рис. 2. Изображение ладони с выделенным участком исследования (жёлтый прямоугольник), трёхмерное изображение структуры участка и один из В-сканов

Исследования показали, что метод ОКТ позволяет визуализировать и оценить особенности структуры пигментно-лакового слоя современного образца живописи. Сравнение толщины лакового слоя и трещин в краске или лаке тест-объекта и в подобных по технике исполнения областях в ранее исследованных старинных предметах живописи [3] позволяют оценить степень сохранности предмета искусства, возможность реставрации утраченного в результате растрескивания лакокрасочного слоя, а также выявлять поздние реставрационные вмешательства.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 19-79-10118) в части разработки лабораторного образца ОКТ-системы и алгоритма обработки данных и при поддержке гранта по Постановлению Правительства Российской Федерации № 220 от 09 апреля 2010 г. (Соглашение № 075-15-2021-593 от 01.06.2021) в части изготовления объекта исследований и полученных экспериментальных результатов.

Список литературы

1. Targowski P., Rouba B., et al. // *Studies in Conserv.* 2004. V. 49. P. 107.
2. Gurov I., Kapranova V., Skakov P. // *Appl. Opt.* 2021. V. 60. P. 6799.
3. Volynsky M.; Gladkova E., et al. // *J. Opt. Tech.* 2021. V. 88. P. 435.

Д.О. МАЛАШИН, А.В. КОШЕЛЕВ

*Производственное объединение «Уральский оптико-механический завод
им. Э.С. Ямалова», филиал «Урал-ГОИ», Санкт-Петербург*

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НЕЙРОМОРФНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ В СОВРЕМЕННЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Рассмотрена задача создания современных специализированных вычислителей для обработки в реальном времени видеоизображений на борту летательных аппаратов. С целью улучшения технических параметров летательного аппарата предлагается использовать технические решения на основе перспективных нейроморфных методов.

D.O. MALASHIN, A.V. KOSHELEV

*Production Association Ural Optical and Mechanical Plant named after E.S. Yalamov,
Saint-Petersburg*

ADVANCED NEUROMORPHIC METHODS OF VIDEO INFORMATION PROCESSING IN MODERN OPTICAL-ELECTRONIC AIRCRAFT SYSTEMS

The problem of creation of modern specialized computing units for real-time processing of video images on board of aircraft is considered. In order to improve the technical parameters of the aircraft, it is proposed to use technical solutions based on promising neuromorphic methods.

Значительных преимуществ использования нейроморфной обработки можно достичь в процессе создания бортового авиационного оборудования для обработки оптической информации, в том числе и в беспилотных летательных аппаратах. Основной сложностью при создании нейроморфных вычислителей является высокая вычислительная сложность для задач реального времени и как следствие высокое энергопотребление и значительные габариты на текущем уровне развития техники. Один из возможных подходов в эффективном создании компактных нейроморфных вычислителей является использование специализированной нейронной сети по выбору наилучшей нейронной сети для решения текущей задачи в зависимости от изменения входных данных в рамках определённых критериев качества, а также для

осуществления непрерывного контроля оценки качества используемой нейронной сети в текущий момент времени [1]. Упрощённая архитектура данного подхода представлена на рис. 1.

Принцип реализации способа нейроморфной обработки [1] базируется на введении в конфигурацию программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) в начальный момент времени специальной натренированной нейронной сети (рис. 2). Данная специальная нейронная сеть выполняет следующие задачи:

1) определение по входным данным наилучшей нейронной сети в конкретный момент времени (или другого алгоритма) для решения текущей задачи в зависимости от изменения условий работы изделия (внешние, внутренние шумы, динамический диапазон, сюжеты изображений, рабочая температура и т.д.); основной задачей дополнительно введённой операции является выбор из множества нейронных сетей (или других решений) наилучшей в рамках заданных критериев качества;

2) оценка качества применяемой нейронной сети в данный момент времени.

Исследования по развитию динамически реконфигурируемых систем [1, 2] и соответствующее применение нейроморфной обработки в бортовых системах позволят увеличить качественные параметры обнаружения и распознавания объектов за счёт использования лучшего алгоритмического решения (на основе выбора из множества решений, хранящихся в энергонезависимой памяти) в конкретный момент времени и для конкретных параметров работы изделия.

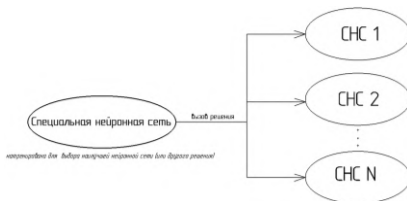


Рис. 1. Упрощённая архитектура нейроморфной обработки

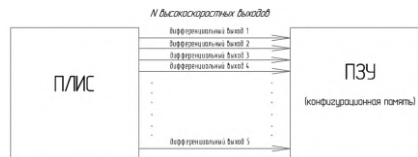


Рис. 2. Структура специализированного высокоскоростного канала передачи данных между ПЛИС и ПЗУ

Список литературы

1. Малашин Д.О., Малашин Р.О. Способ нейроморфной обработки данных и устройство для его осуществления. Патент РФ № 2739340. 2020. Бюл. № 36.
2. Malashin R.O. Principle of least action in dynamically configured image analysis systems // J. Opt. Technol. 2019. V. 86. No. 11. P. 678-685.

Н.Н. ЕВТИХИЕВ, Д.А. РЫМОВ, Р.С. СТАРИКОВ,
П.А. ЧЕРЁМХИН

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

НЕЙРОСЕТЕВОЙ ПОДХОД К ВОССТАНОВЛЕНИЮ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ГОЛОГРАММ

Машинное обучение может позволить оперативно восстанавливать изображения с цифровых голограмм без применения ресурсоёмких методов улучшения качества. Реализован метод восстановления на основе нейронных сетей. Проведено сравнение со стандартным расчётом восстановления.

N.N. EVTIKHIEV, D.A. RYMOV, R.S. STARIKOV,
P.A. CHEREMKHIN

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

NEURAL NETWORK ENABLED HOLOGRAM RECONSTRUCTION

Machine learning-based methods can rapidly reconstruct holographic images without the need for computationally intensive filtering methods. Neural network model for hologram reconstruction was trained. Images reconstructed with the trained model were compared against ones obtained by standard reconstruction algorithms.

В последние годы в оптических и фотонных задачах активно развиваются методы, основанные на машинном обучении [1, 2]. Нейронные сети могут использоваться как для численного расчёта компьютерных голограмм [3], так и восстановления изображений с цифровых голограмм [4]. Подобные методы могут обеспечить значительное ускорение времени расчётов, а также облегчить получение качественных изображений [3]. Применение нейросетей для восстановления с осевых голограмм может позволить избежать дополнительной обработки, например, ресурсоёмких итеративных методов подавления нежелательных порядков дифракции.

Для восстановления изображений реализован нейросетевой подход на основе извлечения амплитудной и фазовой информации об объекте из голограммы. На вход сети подаются голограммы объектов (рис. 1а), а на выход – амплитуда и фаза в плоскости голограммы (рис. 1б и 1в). В результате при применении обученной сети к голограмме создаются два изображения: одно соответствует амплитуде, а второе – фазе в плоскости

голограммы. Они впоследствии могут быть использованы для восстановления изображения объекта (рис. 1д). Исходное изображение дано на рис. 1з, а восстановленное стандартным расчётом дифракции – на рис. 1е. Как видно, метод обеспечил отделение объектной информации от нежелательных порядков дифракции. Качество восстановленных изображений по величине индекса структурного сходства (по 100 проверочным голограммам) из получаемого нейросетевого распределения составило 0,83, а для стандартного восстановления – лишь 0,32.

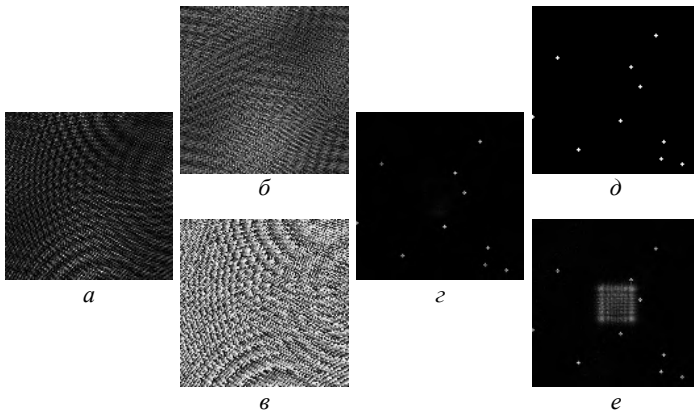


Рис. 1. Пример поданной на вход нейросети голограммы (а) и на выход – амплитудной (б) и фазовой информации (в); пример исходного изображения объекта (з), восстановленного из нейросетевого амплитудно-фазового распределения (д) и стандартным расчётом дифракции (е)

Таким образом, метод показал как возможность восстановления изображений объектов, так и улучшения качества изображения, в том числе за счёт подавления нежелательных порядков дифракции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 20-79-00291.

Список литературы

1. Ma W., Liu Z., Kudyshev Z.A., Boltasseva A., Cai W., Liu Y. // Nature Photonics. 2021. V. 15 (2). P. 77-90.
2. Genty G., Salmela L., Dudley J.M., Brunner D., Kokhanovskiy A., Kobtsev S., Turitsyn S.K. // Nature Photonics. 2021. V. 15 (2). P. 91-101.
3. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Rodin V.G., Rymov D.A., Starikov R.S. // Procedia Computer Science. 2020. V. 169. P. 440-444.
4. Zeng T., Zhu Y., Lam E.Y. // Optics Express. 2021. V. 29. P. 40572-40593.

М.А. ГОРЯЕВ

*Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена,
Санкт-Петербург*

ВЛИЯНИЕ КРАСИТЕЛЯ НА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЕВОЙ n - p СТРУКТУРЫ

Исследованы спектры фотоЭДС в n - p структуре кремния с нанесённым на поверхность красителем. Краситель изменяет величину и спектральное распределение фотоэффекта в результате взаимодействия с поверхностью полупроводника, но спектральной сенсibilизации не наблюдается.

М.А. GORYAEV

Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint-Petersburg

DYE INFLUENCE ON THE PHOTOVOLTAIC PROPERTIES OF THE SILICON n - p STRUCTURE

The photo-EMF spectra in the silicon n - p structure with the dyes applied on the semiconductor surface are investigated. The dye changes the value and spectra of the photovoltaic effect as result of interaction with semiconductor surface, but the spectral sensitization is not found.

Кремниевые структуры широко используются в фотоэлектрических преобразователях солнечных батарей [1] и в ПЗС-матрицах приёмников изображения современных систем регистрации [2]. Была обнаружена эффективная сенсibilизация красителями фотопроводимости на постоянном токе порошкообразного кремния [3] и фотоЭДС монокристаллического кремния [4, 5]. В данной работе исследовались спектры фотоЭДС в монокристаллической структуре на основе кремния (полупроводниковая подложка p -типа толщиной порядка 500 микрон с нанесённым слоем n -типа толщиной порядка 1 микрона) и влияние на фотовольтаический эффект в такой структуре нанесённых на поверхность слоёв органического красителя.

Измерения фотоЭДС образцов проводилось конденсаторным методом [6] при модулированном освещении. Для оценки эффективности внутреннего фотоэффекта измеряемые сигналы ΔU нормировались на одинаковое количество падающих на образец квантов света.

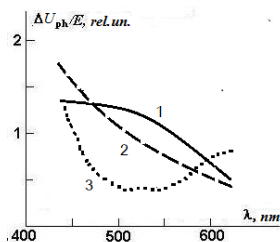


Рис. 1. Спектры
фотоЭДС

На рис. 1 представлены спектры фотоЭДС исходной структуры кремния (кривая 1) и образцов с нанесёнными на полупроводник слоями родамина 6Ж с поверхностными концентрациями молекул красителя 30 нм^{-2} (кривая 2) и 70 нм^{-2} (кривая 3). Величина фотоЭДС исходных образцов (кривая 1) во всей исследованной области спектра уменьшается при увеличении длины волны в соответствии с изменением коэффициента поглощения кремния. При нанесении красителя на

поверхность полупроводника наблюдается изменение величины фотоэффекта и его спектров (кривые 2 и 3). Это может быть связано со сменой знака фотопотенциала в результате взаимодействия красителя с поверхностью кремния при освещении в разных областях спектра [7]. А при нанесении на поверхность кремния слоёв сложных халькогенидов системы Ge-Sb-Te происходит изменение знака регистрируемого сигнала, что может быть связано с формированием в полупроводнике антизапорного изгиба зон [8, 9]. Сенсibilизации фотоэффекта не наблюдается, так как критический радиус переноса энергии от красителя в полупроводник составляет 6 - 8 нм [10], что существенно меньше толщины внешнего слоя n -типа. И только при большой концентрации красителя (кривая 3) заметен фильтровой эффект в области поглощения красителя [5].

Автор благодарен Коссову В.Г. и Иванову В.А. за предоставленные образцы кремниевых структур.

Список литературы

1. Алферов Ж.И., Андреев В.М., Румянцев В.Д. // Физ. и техн. полупроводников. 2004. Т. 38. № 8. С. 937.
2. Boyle W.S. // Rev. Modern Physics. 2010. V. 82. No. 3. P. 2305.
3. Горяев М.А. // Ж. физ. химии. 2015. Т. 89. № 12. С. 1940.
4. Горяев М.А. // Сб. научн. трудов: VIII Межд. конф. по фотонике и информац. оптике. М.: НИЯУ МИФИ. 2019. С. 605.
5. Горяев М.А. // Оптика и спектроскопия. 2019. Т. 127. № 7. С. 167.
6. Акимов И.А. // Оптико-механ. промышл. 1966. № 5. С. 4.
7. Комолов С.А., Герасимова Н.Б. и др. // Журн. техн. физ. 2006. Т. 76. № 7. С. 76.
8. Горяев М.А., Кастро Р.А. и др. // Сб. научн. трудов: IX Межд. конф. по фотонике и информац. оптике. М.: НИЯУ МИФИ. 2020. С. 427.
9. Castro-Arata R., Goryaev M.A. et al. // Proc. 8th Intern. Conference on Photonics, Optics and Laser Technology (PHOTOPTICS 2020). 2020. P. 146.
10. Акимов И.А., Черкасов Ю.А., Черкашин М.И. Сенсibilизированный фотоэффект. М.: Наука, 1980.

Д.В. БУЛЫГА¹, С.К. ЕВСТРОПЬЕВ^{1,2,3}, А.Д. МОРКОВСКИЙ,
С.С. ПАШИН

*Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
Самара*

¹*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

²*Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург*

³*Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)*

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ СВЕТОПОГЛОЩАЮЩИХ ОПТИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Приведены результаты разработки светопоглощающих композиционных материалов на основе эпоксидных полимеров. Для формирования однородного материала были использованы высокодисперсные неорганические модификаторы.

D.V. BULYGA¹, S.K. EVSTROPIEV^{1,2,3}, A.D. MORKOVSKIИ,
S.S. PASHIN

Povozhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara

¹*ITMO University, Saint-Petersburg*

²*S.I. Vavilov State Optical Institute, Saint-Petersburg*

³*Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*

RESEARCH OF DEVELOPED LIGHT-ABSORBING OPTICAL COMPOSITES BASED ON EPOXY POLYMERS

Presents the results of the development light-absorbing composite materials based on epoxy polymers. Highly dispersed inorganic modifiers were used to form a homogeneous material.

Данная работа базируется на исследовании [1] в котором приведены результаты измерений изготовленных растворов на основе нитрата свинца с добавками различных органических стабилизаторов. В данной работе в качестве полимерной основы светопоглощающих органо-неорганических композитов была выбрана эпоксидная полимерная матрица. Для формирования однородного материала были использованы высокодисперсные неорганические модификаторы. Высокодисперсный коммерческий микропорошок магнетита для получения композита, содержащего оксидный модификатор. Для создания высокодисперсных

порошков сульфидов металлов был использован метод осаждения из водных растворов в присутствии органических стабилизаторов, ограничивающих рост осаждаемых частиц сульфидов.

Исследование структуры полученных порошков сульфидов меди и свинца было осуществлено методом рентгенофазового анализа на приборе Rigaku Ultima IV. Для расчётов использовались пики максимальной интенсивности. Измерение микротвёрдости проводилось на приборе ПМТ-3 по стандартной методике. При измерениях продолжительность приложения нагрузки составляла 10 с, а измерение размеров отпечатки пирамиды осуществлялось сразу же после снятия нагрузки.

На рис. 1 приведена рентгенограмма порошка PbS, использованного при изготовлении композиции № 1. На рентгенограмме хорошо видны пики, характерные для кубических кристаллов сульфида свинца. Наиболее интенсивный пик связан с отражением от плоскости (200) кристаллов PbS. Рассчитанные параметры кристаллической ячейки синтезированных кристаллов PbS составили $a = 5.9414(18) \text{ \AA}$; $V = 209.73(19) \text{ \AA}^3$. Средний размер кристаллов в синтезированном нами порошке составил 11 нм, что свидетельствует о высокой эффективности применения поливинилпирролидона для ограничения роста формирующихся наночастиц PbS. При использовании в качестве стабилизатора трилона-Б синтезировали заметно более крупные нанокристаллы PbS имеющие средний размер 64 нм.

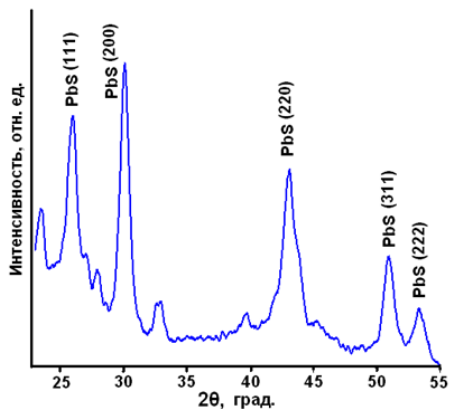


Рис. 1. Рентгенограмма порошка PbS

Список литературы

1. Булыга Д.В., Евстропьев С.К., и др. // Сборник XIX МНТК ФитПИВ-2021. С. 53-54.

А.А. ГУСЬКОВ, С.Д. ЛАВРОВ

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

**ПОВЫШЕНИЕ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ
ФОТОПРИЁМНИКОВ НА ОСНОВЕ ДВУМЕРНОГО WSe₂
С УПОРЯДОЧЕННЫМИ ПЛАЗМОННЫМИ
НАНОТРЕУГОЛЬНИКАМИ Ag**

В этой работе мы сообщаем о многократном увеличении светочувствительности фотоприёмников на основе двумерного полупроводника WSe₂ за счёт использования упорядоченных плазмонных структур серебра. Определены оптимальные параметры таких структур для разных длин волн видимого диапазона.

A.A. GUSKOV, S.D. LAVROV

MIREA – Russian Technological University, Moscow

**SENSITIVITY ENHANCEMENT OF TWO-DIMENSIONAL
WSe₂-BASED PHOTODETECTORS BY ORDERED Ag
PLASMONIC NANOTRIANGLES**

Here we report a multiple-fold photosensitivity enhancement of photodetectors based on two-dimensional semiconductor WSe₂ due to the ordered silver plasmonic structures. We also determined the optimal parameters of such structures for different wavelengths in the visible range.

Двумерные графеноподобные структуры завоёвывают все большую нишу среди многообещающих материалов для наноэлектроники благодаря своим физическим свойствам. Наиболее яркими представителями этого класса материалов являются дихалькогениды переходных металлов (ДПМ). Двухмерность полупроводниковых графеноподобных монослоёв как раз и является источником их уникальных физических свойств [1]. Но это также является источником существенного недостатка: их чрезвычайно малая толщина приводит к низкому поглощению падающего излучения [2]. Это существенно затрудняет создание эффективных фотоэлементов и оптических датчиков.

Существует несколько способов улучшить оптические свойства двумерных ДПМ-структур [3]. Однако наиболее эффективное оптическое поглощение может быть достигнуто при использовании наночастиц или плазмонных антенн, поскольку в таких структурах резонансное

плазмонное усиление электромагнитного поля происходит именно на границе раздела металл/полупроводник [4]. Есть работы, показывающие десятикратное поглощение в монослое ДПМ при использовании нанодисков серебра [5]. В настоящей статье мы приводим результат моделирования поглощения и экспериментальные значения фоточувствительности (рис. 1) при использовании серебряных нанотреугольников (рис. 2). Мы использовали лазеры с длинами волн 407, 532 и 633 нм. Излучение фокусировалось на поверхности структуры с помощью объектива 20х (NA = 0.4).

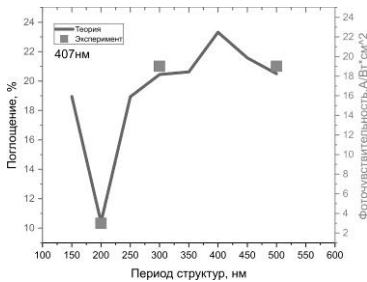


Рис. 1. Поглощение и фоточувствительность на длине волн 407 нм

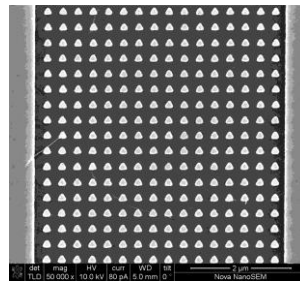


Рис. 2. ЭМ-фотография исследуемых структур

Как видно из рис. 1 результаты эксперимента качественно коррелируют с моделированием. Можно сделать вывод, что для синего света оптимальным значением являются плазмонные структуры с периодом 300 и 500 нм. Аналогичные измерения были проведены для других длин волн. Моделирование и эксперимент показали, что для длин волн 532 и 635 нм оптимальными являются структуры с периодом 300 нм.

Список литературы

1. Khusyainov D.I., et. al. // Russian Technological Journal. 2020. V. 8. № 6. P. 121-129.
2. John P.C.S., et al. // Nature communications. 2020. V. 11. № 1. P. 1-12.
3. Bahaudin S.M., Robatjazi H., et. al // Acs Photonics. 2016. V. 3. № 5. P. 853-862.
4. Gorbatoва A.V., et al. // Technical Physics Letters. 2020. V. 46. № 11. P. 1111-1115.

Н.Ю. КРУЧИНИН, М.Г. КУЧЕРЕНКО

Оренбургский государственный университет

ЭЛЕКТРИЧЕСКИ ИНДУЦИРОВАННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КОНФОРМАЦИЙ ПОЛИАМФОЛИТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ВЫТЯНУТОГО ПЛАЗМОННОГО НАНОСФЕРОИДА

Методом молекулярной динамики были исследованы изменения конформаций полиамфолитов, адсорбированных на поверхности заряженного, а также поляризованного вдоль оси вращения золотого наносфероида, в том числе с периодическим изменением во времени его полярности со сверхвысокой частотой. Предложена аналитическая модель квазиравновесной структуры адсорбированной макроцепи в переменном электрическом поле.

N.Yu. KRUCHININ, M.G. KUCHERENKO

Orenburg State University

ELECTRICALLY INDUCED CHANGES IN THE CONFORMATIONS OF POLYAMPHOLYTES ON THE SURFACE OF AN ELONGATED PLASMONIC NANOSPHEROID

The molecular dynamics was used to study the changes in the conformations of polyampholytes adsorbed on the surface of a charged and also polarized along the rotation axis of a gold nanospheroid, including those with a periodic change in time of its polarity with an ultrahigh frequency. An analytical model is proposed for the quasi-equilibrium structure of an adsorbed macrochain in an alternating electric field.

В результате молекулярно-динамического (МД) моделирования полиамфолитных полипептидов на поверхности заряженного вытянутого металлического наносфероида наблюдалось набухание макромолекулярной опушки, толщина которой была тем больше, чем больше было расстояние между противоположно заряженными звеньями в полипептиде (рис. 1а). А в случае адсорбции полиамфолитов на поверхности поляризованного вдоль большой оси вытянутого наносфероида формировалась рыхлая макромолекулярная опушка в приполярных областях наносфероида и плотная в его центральной области [1].

При МД-моделировании полиамфолитов на поверхности вытянутого наносфероида периодическим изменением во времени его полярности со

сверхвысокой частотой при температуре 300 К происходило образование кольцеобразной опушки в экваториальной области (рис. 1б), ширина которой зависела от амплитуды внешнего поляризующего переменного электрического поля. При температуре 900 К в зависимости от расстояния между разноимёнными заряженными звеньями в макроцепи наблюдались либо изменения формы макромолекулярной опушки от плотно обволакивающей весь наносфероид к гантелеобразной дважды за период колебаний (рис. 1в), либо образование макромолекулярного кольца вокруг наносфероида [2].

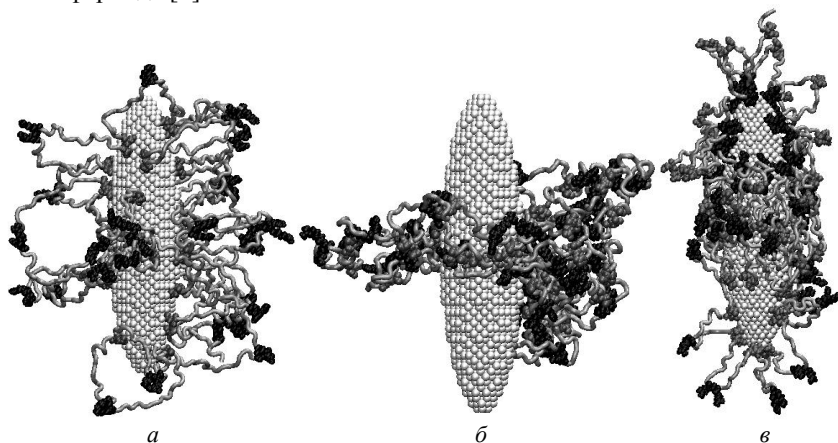


Рис. 1. Конформации полиамфолитного полипептида на поверхности вытянутого золотого наносфероида, полученные по результатам МД-моделирования на заряженном наносфероиде (а), а также с периодическим изменением поляризации наносфероида при температуре 300 К (б) и 900 К (в), на рисунке светло-серая трубка – звенья Ala, чёрным цветом изображены звенья Arg, а серым – Asp

Такие конформационные изменения полиэлектролитов на поверхности вытянутых сфероидальных нанообъектов могут быть использованы как при создании новых, так и модификации существующих сенсоров на основе эффекта гигантского комбинационного рассеяния, нанозондов с переключаемыми под воздействием электрического поля параметрами, а также могут найти применение в ближнепольной оптической микроскопии.

Список литературы

1. Кручинин Н.Ю., Кучеренко М.Г. // Коллоидный журнал. 2021. Т. 83. № 5. С. 557-571.
2. Кручинин Н.Ю., Кучеренко М.Г. // Химия высоких энергий. 2021. Т. 55. № 6. С. 423-435.

М.А. РИДЕР, А.Д. БОЛЬШАКОВ¹, В.М. КОНДРАТЬЕВ¹,
А.С. КУЗНЕЦОВ¹, В.В. ЗАХАРОВ, А.О. ОРЛОВА

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

*¹Санкт-Петербургский национальный исследовательский
академический университет им. Ж.И. Алферова РАН*

ГИБРИДНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ GaP И УГЛЕРОДНЫХ ТОЧЕК

Продemonстрирована возможность создания гибридных наноструктур на основе нитевидных нанокристаллов GaP модифицированных углеродными точками. Приведены результаты исследования оптических и электрофизических свойств полученной системы. Показано, что темновые и при облучении ультрафиолетовым светом спектры импеданса нитевидных нанокристаллов зависят от наличия на их поверхности углеродных точек. Изменение электрофизических свойств свидетельствует о взаимодействии углеродных точек с нитевидными нанокристаллами и может быть использовано для создания фоточувствительного устройства.

M.A. RIDER, A.D. BOLSHAKOV¹, V.M. KONDRATEV¹,
A.S. KUZNETSOV¹, V.V. ZAKHAROV, A.O. ORLOVA

University ITMO, Saint-Petersburg

*¹Saint-Petersburg National Research Academic University
named after Zh.I. Alferov of the RAS*

HYBRID STRUCTURES BASED ON GaP NANOCRYSTALS AND CARBON DOTS

The possibility of creating hybrid nanostructures based on GaP nanocrystals modified with carbon dots is demonstrated. The results of a study of the optical and electrophysical properties of the system created are presented. It is shown that the dark and under irradiation with ultraviolet light impedance spectra of whisker nanocrystals depend on the presence of carbon dots on their surface. A change in the electrophysical properties indicates the interaction of carbon dots with nanocrystals with filaments and can be used to create a photosensitive device.

Системы, состоящие из нитевидных нанокристаллов (ННК) и локализованных на их поверхности углеродных точек (УТ) имеют потенциал для применения в качестве сенсоров, фотокаталитических систем и фотоанодов [1, 2]. Изображение и спектры люминесценции системы из ННК/УТ исследовались при помощи конфокального лазерного

сканирующего микроскопа LSM 710 (Carl Zeiss), при возбуждении на разных длинах волн (рис. 1).

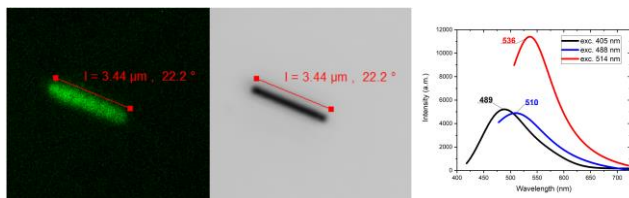


Рис. 1. Люминесцентное изображение и изображение в проходящем свете системы ННК/УТ, и спектры люминесценции УТ при возбуждении на разных длинах волн

Электрофизические свойства гибридной системы на основе ННК/УТ были нанесены на проводящую подложку для измерения электрического импеданса. Спектры электрического импеданса ННК и системы ННК/УТ в диапазоне частот измерительного напряжения от 100 Гц до 500 кГц показаны на рис. 2. Исследован фотоотклик таких систем в темновых условиях и при их облучении светом на длине волны 395 нм. Показано усиление фотоотклика гибридных наноструктур в присутствии УТ на поверхности ННК.

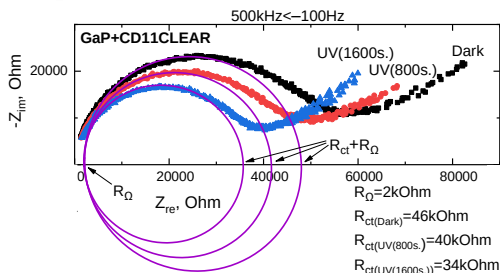


Рис. 2. Годографы полного сопротивления ННК/УТ в темноте и при экспозиции УФ (390 нм): R_{Ω} – сопротивление контактов; R_{ct} – сопротивление ННК

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, госзадание № 2, при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации, грант 08-08.

Список литературы

1. Chen Z., et al. Enhanced visible light driven photocatalytic activities of 0D/1D heterojunction carbon quantum dot modified CdS nanowires // Chinese Journal of Catalysis. 2018. V. 39. P. 841-848.
2. Xu X., et al. Surface states engineering carbon dots as multi-band light active sensitizers for ZnO nanowire array photoanode to boost solar water splitting // Carbon. 2017. V. 121. P. 201-208.

Д.Н. БУХАРОВ, С.М. АРАКЕЛЯН

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СИСТЕМЫ Ag/Au НАНОКЛАСТЕРОВ

Приведены результаты моделирования эффективности поглощения системы Ag/Au нанокластеров. Система нанокластеров моделируется в приближении DLA. Эффективность поглощения для смоделированной структуры оценивается в приближении теории Ми.

D.N. BUKHAROV, S.M. ARAKELIAN

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs

MODELING OF THE OPTICAL PROPERTIES OF Ag/Au NANOCUSTER SYSTEM

The results of modeling the absorption efficiency of the Ag/Au nanocluster system are presented. The system of nanoclusters is modeled in the DLA approximation. The absorption efficiency for the modeled structure is estimated in the Mie theory approximation.

Новые материалы на основе биметаллических систем нанокластеров благородных металлов находят применение в различных областях науки и техники. Особый интерес представляют нанокластерные Ag/Au структуры, полученные методом лазерного термодиффузионного осаждения из коллоидных растворов [1], позволяющим формировать требуемые электрооптические свойства. Для оценки процесса их синтеза и прогнозирования свойств образцов удобно проводить предварительное моделирование их структуры и обусловленных ей оптических свойств.

Модель структуры системы нанокластеров выбиралась на основе анализа фрактальной размерности образцов, методом box-counting [2], величина которой была близка к структурам, получаемым в рамках агрегации ограниченной диффузией (DLA) [3]. DLA-модель была реализована методом клеточного автомата с учётом варьирования вероятности прилипания частиц к агрегату [3].

Для оценки влияния структуры нанокластерных систем на оптические свойства (на спектры пропускания) применялись расчёты, основанные на модели рассеяния электромагнитных волн совокупностью случайно расположенных сфер, с применением теории Ми [4]. Указанный подход

позволил смоделировать величины эффективности поглощения для заданного диапазона длин волн от 200 до 700 нм и на их основе оценить степень пропускания.

На рис. 1 приведена смоделированная структура системы нанокластеров Ag/Au с концентрацией 50:50 при варьировании вероятности прилипания от 1 до 0.01.

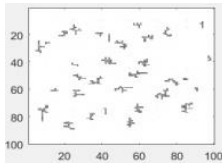


Рис. 1. DLA-модель системы нанокластеров Ag/Au (50:50)

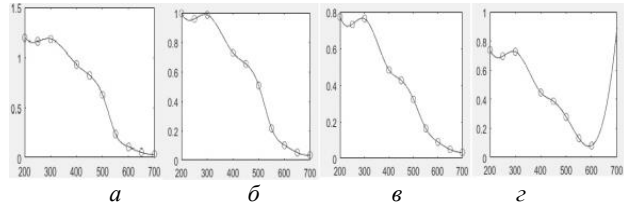


Рис. 2. Зависимости величины эффективности поглощения от длины волны при различных средних величинах нанокластеров: 5 нм (а), 10 нм (б), 50 нм (в), 100 нм (г)

На рис. 2 приведены зависимости величины эффективности поглощения от длины волны, смоделированные на основе теории Ми для различных средних величин нанокластеров для систем Ag/Au (50:50). Из рис. 2 можно сделать заключение о том, что средние размеры нанокластеров от 10 до 100 нм позволяют снизить величину эффективности поглощения для длин волн до 700 нм, а зависимости имеют одинаковый характер с сохранением максимумов. При величинах нанокластеров больших или равных 100 нм наблюдается сильный скачок величины эффективности поглощения, начиная с длины волны 600 нм.

Предложенная модель при переходе к спектрам пропускания допускает сравнение с измеренными значениями. Проведённое сравнение показало удовлетворительное качественное совпадение. Таким образом, предложенный подход позволяет в первом приближении оценить оптические свойства полученных структур.

Список литературы

1. Антипов А.А. и др. // Оптика и спектроскопия. 2014. Т. 116. № 2. С. 349-352.
2. Gonzato G., // Computers & Geosciences.1998. V. 24. P. 95-100.
3. Bukharov D.N., et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2020. V. 1439. P. 012050.
4. Muinonen K., et al. // Radio Science. 2017. V. 52. P. 1419-1431.

Е.Д. ЛЕБЕДЕВА, С.Д. ЛАВРОВ

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В КВАЗИДВУМЕРНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ ДИХАЛЬКОГЕНИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

В работе представлены результаты оптического поглощения на длинах волн экситонного резонанса в гетероструктурах на основе квазидвумерных дихалькогенидов переходных металлов. Показана возможность увеличения диапазона рабочих длин волн насыщающихся покрытий за счёт выбора оптимального соотношения толщин полупроводниковых слоёв.

E.D. LEBEDEVA, S.D. LAVROV

MIREA – Russian Technological University, Moscow

MODELING OF OPTICAL ABSORPTION IN QUASI-TWO-DIMENSIONAL TRANSITION METAL DICHALCOGENIDES HETEROSTRUCTURES

This work presents the results of simulation of spectrally homogeneous optical absorption at exciton resonance wavelengths in heterostructures based on quasi-two-dimensional dichalcogenides of transition metals. The possibility of increasing the working wavelength range of saturable coatings by selecting an optimal ratio of the thicknesses of semiconductor layers is shown.

Ключевыми элементами импульсных лазеров являются насыщающиеся поглотители. Основными требованиями к материалам для насыщающихся поглотителей, являются хорошие характеристики поглощения, а именно коэффициент пропускания возрастает с увеличением мощности падающего излучения, высокий порог повреждения, низкий порог модуляции добротности и синхронизации мод.

Сравнительно недавно дихалькогениды переходных металлов (ДПМ) смогли зарекомендовать себя, как наиболее перспективные материалы для этой задачи. Они являются полупроводниками и обладают запрещённой зоной $1 \div 2$ эВ, обеспечивают мгновенное насыщение, высокую стабильность и широкий диапазон рабочих длин волн. Не смотря на все плюсы ДПМ, они обладают неоднородным спектром поглощения. Наибольшим поглощением они обладают в области их экситонного

резонанса, но ширина этой области мала и обычно не превышает 40 нм. При всём этом следует заметить, что поглощение в этих материалах на длинах волн, отличных от экситонного резонанса почти отсутствует. Все это позволяет расширить спектральную область работы резонаторов. Одним из способов решения этой проблемы, может является создание многослойной квазидвумерной плёнки на основе ДПМ с разным составом, где каждый слой будет работать на своей, определённой, длине волны.

В данной работе исследуется возможность создания гетероструктур на основе квазидвумерных ДПМ, обладающих спектрально-однородным оптическим поглощением на длинах волн их экситонного резонанса. Для гетероструктур были выбраны WS_2 и WSe_2 материалы, обладающие наибольшей разницей в значении ширины запрещённой зоны, что делает прекрасными кандидатами при создании широко-спектральных полупроводниковых плёнок.

Так как на итоговые параметры поглощения в гетероструктуре может влиять множество параметров, в том числе, комбинация толщин слоёв, благодаря которой можно менять рабочие длины волн. Что бы учесть это были промоделированы поглощения в каждом слое структуры при разных толщинах на длинах волн их экситонных резонансов, 612 нм для WS_2 и 748 нм для WSe_2 . Были выделены оптимальные соотношения толщин слоёв ДПМ, при которых наблюдается равномерное оптическое поглощение на экситонных пиках каждого материала. Наиболее оптимальной была выбрана точка с толщиной WS_2 , равной 1.86 нм и WSe_2 , равной 2.86 нм. Для этой точки был построен спектр поглощения, где явными пиками выделяется в суммарном поглощении, выделяются две точки, соответствующие экситонным резонансам выбранных материалов. А также показано, что в каждой из двух характерных точек основной вклад вносит только один материал.

Таким образом, в данной работе показано, что использование квазидвумерной гетероструктуры WS_2/WSe_2 может помочь в решении проблемы увеличения диапазона рабочих длин волн насыщающегося поглотителя. Данная структура при малом количестве атомарных слоёв может обладать поглощением до 45 % на длинах волн, обусловленных экситонными резонансами материалов входящих в гетероструктуру.

Н.Ю. ПИМЕНОВ, А.Ю. АВДИЖИЯН, С.Д. ЛАВРОВ,
Е.Д. ЛЕБЕДЕВА

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОННОЙ СТРУКТУРЫ ТВЁРДЫХ РАСТВОРОВ ДВУМЕРНЫХ ДИХАЛЬКОГЕНИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

Представлены результаты расчёта зонной структуры твёрдых растворов двумерных дихалькогенидов переходных металлов $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{S}_{2y}\text{Se}_{2(1-y)}$. Расчёты выполнены в рамках теории функционала плотности с обменно-корреляционным функционалом Пердью-Бурке-Эйзернхоффа. По полученным результатам определена зависимость ширины запрещённой зоны от морфологического состава исследуемых структур.

N. Yu. PIMENOV, A. Yu. AVDIZHIYAN, S.D. LAVROV,
E.D. LEBEDEVA

MIREA – Russian Technological University, Moscow

MODELING THE BAND STRUCTURE OF SOLID SOLUTIONS OF TWO-DIMENSIONAL TRANSITION METAL DICHALCOGENIDES

The results of the calculation band structure of solid solutions of two-dimensional transition metal dichalcogenides $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{S}_{2y}\text{Se}_{2(1-y)}$ are presented. The calculations were performed within the framework of the density functional with the Purdue-Burke-Eisernhoff exchange-correlation functional. According to the results obtained, the dependence of the band gap on the morphological composition of the studied structures is determined.

После открытия способа получения графена Новоселовым и Геймом в 2004 году [1] возник большой интерес к изучению его свойств и способов применения. Помимо графена появилось множество работ, посвящённых исследованию других двумерных материалов, которые обладают уникальными свойствами по сравнению с объёмными образцами. Одним из классов таких материалов являются дихалькогениды переходных металлов (ДПМ). Данные материалы имеют структуру MX_2 , где М – атом переходного металла, а Х – атом халькогена и являются полупроводниками, в отличие от графена, являющегося полуметаллом. При этом при переходе от объёмных структур к монослойным происходит

увеличение ширины запрещённой зоны и переход от непрямозонного полупроводника к прямозонному [2]. Данная особенность делает ДПМ перспективными материалами для создания различных оптоэлектронных приложений [3].

Важным параметром, определяющим оптическое поглощение материала, является запрещённая зона. В двумерных ДПМ она составляет порядка $1 \div 2$ эВ, что соответствует видимой и ближней инфракрасной области спектра. Так как количество различных ДПМ весьма ограничено, область используемого спектрального диапазона является дискретной. Одним из способов решения данной проблемы является использование твёрдых растворов на основе двумерных ДПМ (например, $\text{MoS}_{2x}\text{Se}_{2(1-x)}$ или $\text{Mo}_x\text{W}_{x-1}\text{S}_2$). Меняя морфологический состав данных структур можно довольно точно контролировать ширину запрещённой зоны. Так как зависимость ширины запрещённой зоны от морфологического состава носит нелинейный характер, возникает необходимость в определении данной зависимости.

В данной работе в рамках теории функционала плотности выполнен расчёт зонной структуры двумерных твёрдых растворов $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{S}_{2v}\text{Se}_{2(1-v)}$ и определена зависимость ширины запрещённой зоны от их морфологического состава. Расчёты были выполнены в программном пакете QUANTUM ESPRESSO [4] с обменно-корреляционным функционалом Пердю-Бурке-Эйзернхоффа. Для расчётов была сгенерирована суперячейка, размерностью 2×2 элементарных ячеек и включающая в себя 4 атома металла и 8 атомов халькогенов.

Показано, что меняя морфологический состав двумерных твёрдых растворов $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{S}_{2v}\text{Se}_{2(1-v)}$ можно получать составы с шириной запрещённой зоны в пределах от порядка 1.4 до 1.8 эВ. При этом минимальной шириной запрещённой зоны, обладают растворы близкие по своему составу к MoSe_2 , а максимальной – растворы, близкие по своему составу к WS_2 .

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 19-72-10165.

Список литературы

1. Novoselov K.S., et al. // Science. 2004. V. 306 (5696) P. 666-669.
2. Yun W.S., et al. // Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys. 2012. V. 85(3).
3. Choi W., et al. // Mater. Today. 2017. V. 20(3). P. 116-130.
4. Giannozzi P., et al. // J. Phys. Condens. Matter. 2009. V. 21 (39). P. 395502.

К.Н. БАРАНОВ, Е.П. КОЛЕСОВА, А.Ю. ДУБОВИК, А.О. ОРЛОВА
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ВЛИЯНИЕ ОБОЛОЧКИ ИЗ СУЛЬФИДА ЦИНКА НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОКОМПОЗИТОВ AIS/TiO₂

В работе были синтезированы два типа нанокompозитов AgInS₂/TiO₂ и AgInS₂/ZnS/TiO₂, отличающихся наличием оболочки ZnS. Композиты сочетают в себе каталитические свойства TiO₂ и люминесцентные свойства квантовых точек (КТ) AgInS₂. У нанокompозитов AgInS₂/TiO₂ при наращивании TiO₂ наблюдалось полное тушение люминесценции. Оболочка ZnS на КТ позволила сформировать композиты с квантовым выходом люминесценции 2 %. Исследование эффективности генерации АФК продемонстрировало, что оболочка ZnS значительно снижает генерацию АФК под действием видимого излучения за счёт переноса электрона от ядра к оболочке нанокompозитов.

K.N. BARANOV, E.P. KOLESOVA, A.U. DUBAVIK, A.O. ORLOVA
ITMO University, Saint-Petersburg

INFLUENCE OF A ZINC SULFIDE SHELL ON THE OPTICAL PROPERTIES OF AIS/TiO₂ NANOCOMPOSITES

Here we synthesized two types of nanocomposites AgInS₂/TiO₂ and AgInS₂/ZnS/TiO₂ differing in the presence of a ZnS shell. The composites will combine the catalytic properties of TiO₂ and the luminescent properties of AgInS₂ quantum dots. In the AgInS₂/TiO₂ nanocomposites, upon growing TiO₂, complete quenching of luminescence was observed. The ZnS shell on QD allowed to form composites with a luminescence quantum yield of 2 %. A study of the efficiency of ROS generation demonstrated a significant reduction in ROS generation upon growing ZnS shell in visible irradiation due to an electron transfer from the core to the shell of nanocomposites.

Окисдaтивный стресс бактерий при взаимодействии с активными формами кислорода (АФК) может привести к дальнейшей гибели бактерии [1]. Одним из эффективных источников генерации АФК являются наноструктурированный диоксид титана [2]. Актуальной является задача расширения спектрального диапазона активности TiO₂ в видимую область, для этого могут быть сформированы гибридные структуры на основе полупроводниковых квантовых точек (КТ) и наночастиц TiO₂. Такие системы, сочетающие в себе оптические свойства

КТ и высокую фотокаталитическую активность TiO_2 , могут быть перспективными для терапии бактериальных инфекций. Формирование гибридных структур на стадии синтеза позволит создавать структуры с заданной архитектурой и значительно увеличить антибактериальную активность системы за счёт эффективного фотоиндуцированного переноса электронов от КТ к TiO_2 [3]. Тройные AgInS_2 (AIS) являются менее токсичной альтернативой КТ CdSe , кроме того, константа скорости переноса электрона существенно выше, чем у CdSe [3, 4].

В данной работе были синтезированы два типа гибридных нанокompозитов $\text{AgInS}_2/\text{TiO}_2$ и $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}/\text{TiO}_2$ [5]. В первом случае нанокompозиты состояли из ядра КТ AgInS_2 , покрытого оболочкой TiO_2 . Эффективный перенос электрона должен сопровождаться тушением люминесценции КТ. Квантовый выход люминесценции КТ AIS составлял 4 %, в результате наращивания TiO_2 происходило полное тушение люминесценции КТ. Оболочка ZnS может повысить квантовый выход люминесценции КТ и снизить эффективность переноса электрона за счёт наличия физического барьера между донором и акцептором электрона. Таким образом, во втором типе структур в качестве ядра выступали КТ AIS/ ZnS . Квантовый выход люминесценции нанокompозитов после наращивания оболочки уменьшился с 33 до 2 %, что сопровождалось сокращением среднего времени затухания люминесценции с 422 до 193 нс. Нанокompозиты AIS/ TiO_2 продемонстрировали эффективную генерацию АФК под действием видимого излучения, в композитах AIS/ ZnS/TiO_2 эффективность генерации АФК за счёт переноса электрона от ядра к оболочке оказалась существенно ниже. В дальнейшем будет предложена модель, описывающая фотофизические процессы в нанокompозитах.

Исследование было выполнено при финансовой поддержке гранта НИРМА ФТ МФ Университета ИТМО.

Список литературы

1. Milter R., et al. ROS are Good // *Trends in Plant Science*. 2017. V. 22(1). P. 11-19.
2. Yang L., et al. Mechanisms. of photogenerated reactive oxygen species and correlation with the antibacterial prop. of engineered metal-oxide nanoparticles // *ACS Nano*. 2021. V. 6(6). P. 5164-5173.
3. Kobosko S., et al. Indium-rich AgInS_2 - ZnS quantum dots – Ag:Zn dependent photophysics and photovoltaics // *The Jour. of Phys. Chem. C*. 2018. V. 122(26). P. 14336-14334.
4. Kolesova E., et al. Photoinduced charge transition in hybrid structures based on titan dioxide NPs with multi QD excitation luminescent decay // *The Jour. of Phys. Chemis. C*. 2019. V. 123. P. 14790-14796.
5. Lee S., et al Thin amorph TiO_2 shell on CdSe nano QD enhances photo of hydro evolution from water // 2014. V. 188(41). P. 23627-23634.

Т.Е. СЕЙСЕМБЕКОВА, А.А. БОКАНОВА, А.К. АЙМУХАНОВ,
А.К. ЗЕЙНИДЕНОВ, Б.Р. ИЛЬЯСОВ¹

¹*Карагандинский университет им. акад. Е.А. Букетова, Казахстан*

²*Университет информационных технологий Астаны, Нур-Султан, Казахстан*

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОНКИХ ПЛЁНОК ZnO РАЗЛИЧНОЙ ТОЛЩИНЫ

Методом spin-coating на FTO получены плёнки ZnO разной толщины. Увеличение скорости вращения подложки в процессе получения плёнки приводит к уменьшению шероховатости поверхности плёнки в 2.6 раза. Измерены спектры поглощения плёнок. Наблюдаемое увеличение оптической ширины запрещённой зоны плёнки с уменьшением толщины связано с уменьшением степени кристалличности ZnO.

T.E. SEISEMBEKOVA, A.A. BOKANOVA, A.K. AIMUKHANOV,
A.K. ZEINIDENOV, B.R. ILYASSOV¹

¹*Buketov Karaganda University, Kazakhstan*

²*Astana IT University, Nur-Sultan. Kazakhstan*

INVESTIGATION OF OPTICAL PROPERTIES OF ZnO THIN FILMS OF DIFFERENT THICKNESS

With spin-coating method on FTO, ZnO film of different thickness were received. The increase of speed in spinning substrate at the process of receiving film leads to reducing roughness of surface at 2.6 times. Several specters of absorbing film were measured. The observed increase of optical thickness of film's restricted zone with reducing the thickness is connected with reducing the degree of ZnO crystallization.

В настоящей работе нами исследованы влияние толщины плёнки на структуру, морфологию поверхности и оптические свойства тонких плёнок ZnO. Кроме того, исследовано влияние толщины слоя ZnO на динамику переноса фотоиндуцированных электронов в ячейках. На сегодняшний день на основе донорного полимера РЗНТ получено КПД равное 3.16 %, что является одним из самых высоких показателей, достигнутых в настоящее время [1, 2].

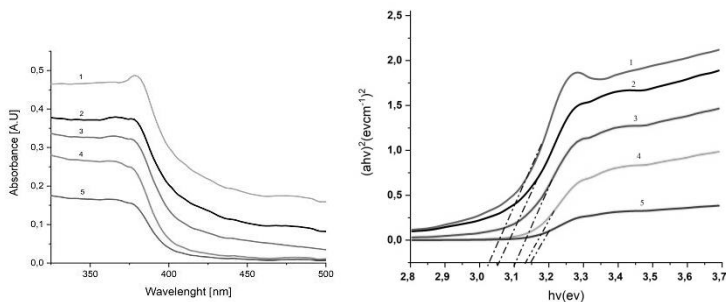


Рис. 1. Спектры поглощения плёнок ZnO: 1 – 86 ± 5 нм; 2 – 68 ± 5 нм; 3 – 54 ± 5 нм; 4 – 42 ± 5 нм; 5 – 26 ± 5 нм

На рис. 1 заметно синее смещение края основного поглощения ZnO с уменьшением толщины плёнки. Кроме того, уменьшение толщины приводит к снижению интенсивности поглощения. Оптическая ширина запрещённой зоны ZnO была рассчитана по спектрам поглощения [3]. Была исследована зависимость поглощения при 380 нм и оптической запрещённой зоны ZnO от толщины плёнки. Уменьшение толщины плёнки приводит к увеличению запрещённой зоны ZnO, что, согласно [4], может быть связано с ухудшением кристалличности ZnO. Однако, когда толщина становится слишком небольшой, ширина запрещённой зоны сужается, что, возможно, связано с явлениями квантового ограничения размера.

Список литературы

1. Liang Z., Zhang Q. Jiang Lin, Cao G. ZnO cathode buffer layers for inverted polymer solar cells // *Energy Environ. Sci.* 2015. V. 8. P. 3442.
2. Ahmadi M., Shafiey M., Ghazanfarpour D.S., Ghazanfarpour S. Bulk heterojunction polymer solar cell, using ZnO nanorods with various mass ratios of P3HT:PCBM blend as the active layer // *Applied Physics A.* 2019. V. 125. P. 604.
3. Makula P., Pacia M. How to correctly determine the band gap energy of modified semiconductor photocatalysts based on UV-vis spectra // *J. Phys. Chem. Lett.* 2018, V. 9. P. 6814-6817.
4. Chen H., Ding J. Enhanced mechanism investigation on violet-blue emission of ZnO films by incorporating Al and Zn to form ZnO-Al-Zn films // *Optical Materials.* 2016. V. 62. P. 505-511.

В.В. ГАВРУШКО, В.А. ЛАСТКИН¹, И.С. ТЕЛИНА

Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого

¹ОАО «ОКБ-Планета», Великий Новгород

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЁНОК ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

Исследованы спектры пропускания пиролитически осаждённых слоёв кремния толщиной 0,1 ... 0,8 мкм на сапфире. Определены коэффициенты преломления в диапазоне 0,5 ... 2,7 мкм. Увеличение толщины плёнки от 0,1 до 0,8 мкм приводило к снижению показателя преломления от 3,2 до 2,8 при $\lambda = 1,5$ мкм. Определены коэффициенты поглощения в диапазоне 0,37 - 0,5 мкм. Сравнение с монокристаллическим кремнием показало более высокие значения коэффициента поглощения в осаждённых слоях. Полученные результаты могут быть полезны при разработке оптических элементов фотоприёмников.

V.V. GAVRUSHKO, V.A. LASTKIN¹, I.S. TELINA

Novgorod State University Yaroslav the Wise

¹OJSK «Planeta-OKB», Veliky Novgorod

OPTICAL PROPERTIES OF POLYCRYSTALLINE SILICON FILMS

The transmission spectra of pyrolytically deposited silicon layers with a thickness of 0.1 ... 0.8 μm on sapphire have been investigated. The refractive indices were determined in the range of 0.5 ... 2.7 microns. An increase in the film thickness from 0.1 to 0.8 μm led to a decrease in the refractive index from 3.2 to 2.8 at $\lambda = 1.5$ μm . The absorption coefficients were determined in the range 0.37 - 0.5 μm . Comparison with monocrystalline silicon showed higher values of the absorption coefficient in the polysilicon layers. The results obtained can be useful in the development of optical elements of photodetectors.

Слои поликристаллического кремния достаточно широко применяются в технологии полупроводниковых приборов. [1]. Хорошо отработаны технологические процессы осаждения поликремния на различные подложки. Вместе с тем отмечается высокая чувствительностью свойств нано- и поликристаллического кремния к технологии их получения [2]. Кроме традиционного использования представляет интерес применение тонких поликристаллических слоёв в качестве оптических элементов, например, как абсорбционных фильтров фотоприёмников. Из-за

разупорядочения структуры кремний в тонких слоях может существенно отличаться по оптическим свойствам от монокристаллического кремния.

Целью работы являлось исследование влияния толщины осаждённой плёнки поликремния на спектральную зависимость коэффициентов преломления и коэффициентов поглощения оптического излучения. Исследование проведено для наиболее часто используемого диапазона толщин плёнок от 0,1 до 0,8 мкм.

Осаждение поликремния осуществлялось путём пиролиза моносилана при температуре 630 °С в реакторе с пониженным давлением. Микроскопические исследования показали, что полученные плёнки достаточно однородны. С ростом толщины покрытия наблюдалось увеличение размеров зерна и плёнки становились менее рельефными. Спектры пропускания тестовых образцов обнаруживали ярко выраженные интерференционные экстремумы, позволившие определить коэффициенты преломления. Результаты представлены на рис. 1. На рис. 2 представлены спектральные зависимости коэффициентов поглощения поликристаллических плёнок (кривая 1). Сравнение с монокристаллическим кремнием (кривая 2) показало более высокие значения коэффициента поглощения в осаждённых слоях.

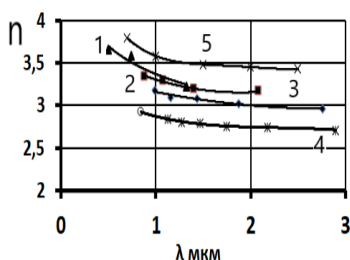


Рис. 1. Коэффициенты преломления для плёнок толщиной
1 – 0,103, 2 – 0,330, 3 – 0,464,
4 – 0,794 мкм, 5 – монокристаллы

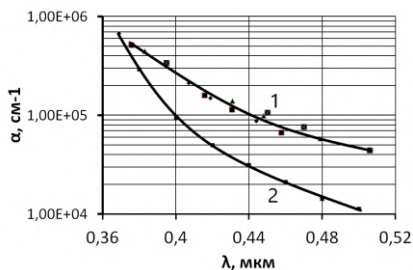


Рис. 2. Коэффициенты оптического поглощения.
1 – поликремний,
2 – монокристалл

Полученные результаты могут быть полезны при разработке оптических элементов фотоприёмников.

Список литературы

1. French P// J Polysilicon: a versatile material for Microsystems. Sensors and actuators A: Physical. 2002. V. 99. P. 3-12.
2. Хенкин М.В., Емельянов А.В., Казанский А.Г. // ФТП. 2013. Т. 47. Вып. 9. С. 1283-1287.

А.И. ВАНИН¹, Н.И. ПУЧКОВ¹, В.Г. СОЛОВЬЕВ^{1,2}, С.Д. ХАНИН²,
А.В. ЦВЕТКОВ¹, М.В. ЯНИКОВ¹

¹Псковский государственный университет

²Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Будённого,
Санкт-Петербург

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ОПАЛОВ

Спектры брэгговского отражения металлodieлектрических структур на основе опалов согласуются с результатами эллипсометрических измерений.

A.I. VANIN¹, V.G. SOLOVYEV^{1,2}, N.I. PUCHKOV¹, S.D. KHANIN²,
A.V. TSVETKOV¹, M.V. YANIKOV¹

¹Pskov State University

²S.M. Budyonny Military Academy of the Signal Corps, Saint-Petersburg

ON THE POSSIBILITY OF USING ELLIPSOMETRY IN INVESTIGATIONS OF OPTICAL PROPERTIES OF METAL-DIELECTRIC STRUCTURES BASED ON OPALS

The Bragg reflection spectra of metal-dielectric structures based on opals are consistent with the results of ellipsometric measurements.

Метод эллипсометрии использовался для изучения оптических свойств фотонных кристаллов (ФК) на основе опалов лишь в немногих известных авторам работах [1 - 4]. Найденная в работе [5] корреляция максимумов в спектрах эллипсометрического параметра $\Psi(\lambda)$ с максимумами брэгговских спектров отражения $R(\lambda)$ массивных синтетических опалов свидетельствует о возможности использования метода спектральной эллипсометрии, наряду с методом брэгговской спектроскопии, для исследования свойств таких ФК. Поляризационная анизотропия оптических свойств опалов при больших углах падения света выражена максимально для электромагнитных (ЭМ) волн с p - и s -поляризациями, что является достоинством метода спектральной эллипсометрии в сравнении с методом брэгговской спектроскопии, поскольку интенсивность брэгговских спектров отражения для данного диапазона углов может быть низкой вследствие рассеяния света в образце.

Коэффициенты отражения для двух типов поляризации ЭМ-волны (R_p и R_s) связаны с эллипсометрическими параметрами Ψ и Δ соотношением

$$\operatorname{tg} \Psi \cdot e^{i\Delta} = R_p / R_s \quad (1)$$

В опытах с плазмонно-фотонными гетерокристаллами (ПФГК) Ag/SiO₂/Ag/ML/Ag, полученными нами последовательным нанесением металлических (Ag) и диэлектрических (SiO₂) плёнок на монослой (ML) опаловых глобул из полиметилметакрилата [6], были определены обе части равенства (1). Угол Ψ измерялся с помощью спектроэллипсометра «Эллипс-1891», величины R_p и R_s – на экспериментальной установке на базе спектрометра Ocean Optics QE65000. Сходство полученных оптических спектров металлodieлектрических структур на основе опалов (рис. 1) подтверждает возможность использования спектральной эллипсометрии для исследования их свойств.

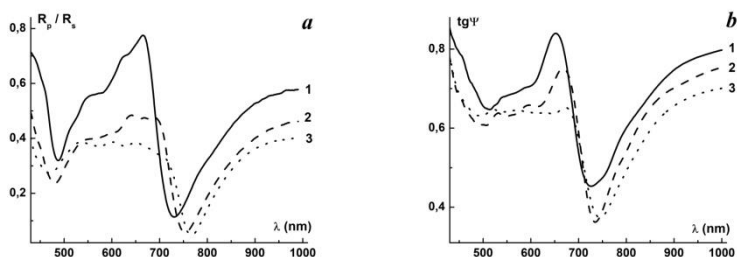


Рис. 1. Оптические спектры ПФГК Ag/SiO₂/Ag/ML/Ag, полученные делением коэффициентов отражения при p - и s -поляризациях света (а) и с помощью эллипсометрических измерений (б) при углах падения 50 ° (1), 60 ° (2) и 70 ° (3)

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90003.

Список литературы

1. Ahles M., Ruhl T., Hellmann G.P., Winkler H., Schmechel R., von Seggern H. // Optics Communications. 2005. V. 246. P. 1-47.
2. Reza A., Balevicius Z., Vaisnoras R., Babonas G.J., Ramanavicius A. // Thin Solid Films. 2011. V. 519. P. 2641-2644.
3. Плеханов А.И., Чубаков В.П., Чубаков П.А. // ФТТ. 2011. Т. 53. № 6. С. 1081-1087.
4. Waleczek M., Dendooven J., Dyachenko P., Petrov A.Y., Eich M., Blick R.H., Detavernier C., Nielsch K., Furlan K.P., Zierold R. // Nanomaterials. 2021. V. 11. P. 1053.
5. Alexeeva N., Cema G., Lukin A., Pan'kova S., Romanov S., Solov'yev V., Veisman V., Yanikov M. // J. Self-Assembly and Molecular Electronics. 2013. V. 1. No. 2. P. 209-222.
6. 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.

А.А. СЕРЕГИН¹, О.В. ЧЕРНЫШЕВА¹, А.В. ШЕЛЯКОВ¹,
Н.Н. СИТНИКОВ^{1,2}, К.А. БОРОДАКО¹, А.А. ВЕЛИГЖАНИН³,
Р.В. СУНДЕЕВ⁴

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²Исследовательский центр им. М.В. Келдыша, Москва

³Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

⁴МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

EXAFS-СПЕКТРОСКОПИЯ БЫСТРОЗАКАЛЁННЫХ Ti₅₀Ni₂₀Cu₃₀ СПЛАВОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

Проведено исследование локальной структуры образцов сплавов Ti-Ni-Cu с 30 ат.% меди, полученных путём электроимпульсной и изотермической кристаллизации с помощью метода EXAFS-спектроскопии. Результаты показали влияние типа термообработки на локальную структуру аустенитной фазы, тогда как в мартенситной отличия практически отсутствуют.

A.A. SEREGIN¹, O.V. CHERNYSHEVA¹, A.V. SHELYAKOV¹,
N.N. SITNIKOV^{1,2}, K.A. BORODAKO¹, A.A. VELIGZHANIN³,
R.V. SUNDEEV⁴

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

²Keldysh Research Center, Moscow

³National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow

⁴MIREA – Russian Technological University, Moscow

EXAFS-SPECTROSCOPY OF RAPIDLY QUENCHED Ti₅₀Ni₂₀Cu₃₀ SHAPE MEMORY ALLOYS

The local structure of Ti-Ni-Cu alloys with 30 at.% of copper was researched by means of EXAFS-spectroscopy. The alloys were produced by isothermal and electropulsing treatment. It was shown that the method of thermal treatment affects the local structure of austenitic phase, and there are almost no differences in martensitic phase.

Исследуемые образцы сплава Ti₅₀Ni₂₀Cu₃₀ были получены методами спиннингования расплава и планарного литья при скорости охлаждения расплава около 10⁶ К/с в исходном аморфном состоянии в виде тонких лент толщиной 30 - 50 мкм. Затем образцы были кристаллизованы путём изотермического отжига на воздухе при 500 °С в течение 4 минут (ИК) и электроимпульсным методом с длительностью 10 мс (ЭК).

Структура сплавов, их свойства и наличие ЭПФ во многом зависят от содержания Cu и Ni [1, 2], поэтому исследовались три ближайшие координационные сферы Cu и Ni. Форма экспериментальной EXAFS-функции $\chi(k)k^2$ немного отличается для двух типов термообработки и содержания Cu. Сравнение модулей фурье-преобразования (FT) EXAFS-функций на краях поглощения K-Ni и K-Cu показало, что амплитуда K-Ni FT заметно меньше, что свидетельствует о более высокой степени разупорядочения атомов в ближайших координационных сферах никеля по отношению к окружению меди. Сравнение FT EXAFS-функций на крае K-Ni для аустенитной и мартенситной фазы показывает, что амплитуда первого максимума для образца ИК меньше, что указывает на более высокую степень разупорядочения атомов (величину фактора Дебая-Валлера) в локальной структуре вокруг атомов никеля. Такое же отличие спектров наблюдается и на K-Cu крае.

Результаты подгонки спектров EXAFS показали, что, как и в сплаве $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ [3], локальная структура вокруг атомов Ni и Cu в сплавах $Ti_{50}Ni_{20}Cu_{30}$ отличается. Согласно результатам, локальная структура Ni более разупорядочена и деформирована по сравнению с локальным окружением Cu, которое ближе к структуре обычного мартенсита. Такие же отличия координационных радиусов наблюдаются и в аустенитной фазе.

В мартенситном состоянии параметры локальной структуры образцов практически одинаковы. Однако, для образца ЭК в аустенитном состоянии факторы Дебая-Валлера оказались меньше, чем для ИК. То есть, локальная структура вокруг атомов никеля и меди более упорядочена для образца ЭК. Таким образом, электроимпульсная кристаллизация даёт более упорядоченную локальную структуру, нежели изотермическая.

Список литературы

1. Sitnikov N.N., Shelyakov A.V., Khabibullina I.A., Mitina N.A., Resnina N.N. Effect of copper content on the structure and phase transformations in melt-spun TiNi–TiCu alloys // General Purpose Materials. 2018. P. 279-285.
2. Chernysheva O.V., Shelyakov A.V., Sitnikov N.N., Veligzhanin A.A., Borodako K.A., Sundeev R.V. Local atomic and crystal structure of rapidly quenched TiNiCu shape memory alloys with high copper content // Mater. Lett. 2020. V.285.
3. Menushenkov A., Grishina O., Shelyakov A., Yaroslavtsev A., Zubavichus Y., Veligzhanin A., Bednarcik J., Chernikov R., Sitnikov N., Local atomic and crystal structure rearrangement during the martensitic transformation in $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ shape memory alloy // Journal of Alloys and Compounds. 2014. V. 585. P. 428-433.

А.Е. КАНАПИНА, Д.А. АФАНАСЬЕВ

Карагандинский университет им. акад. Е.А. Букетова, Казахстан

ПОНИЖЕНИЕ ПОРОГА ГЕНЕРАЦИИ ЭТАНОЛЬНОГО РАСТВОРА КАТИОННОГО ПОЛИМЕТИНОВОГО КРАСИТЕЛЯ В ПРИСУТСТВИИ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА

Представлены экспериментальные результаты, полученные при исследовании влияния плазмонных наночастиц серебра на генерационные свойства этанольного раствора катионно симметричного индокарбоданинового красителя.

A.E. KANAPINA, D.A. AFANASYEV

Buketov Karaganda University, Kazakhstan

LOWERING THE THRESHOLD FOR THE GENERATION OF AN ETHANOL SOLUTION OF A CATIONIC POLYMETHINE DYE IN THE PRESENCE OF SILVER NANOPARTICLES

Experimental results obtained in the study of the effect of plasmonic Ag nanoparticles on the lasing properties of an ethanol solution of a cationically symmetric indocarbocyanine dye are presented.

Использование наночастиц (НЧ) благородных металлов может понижать порог и улучшать качество генерации лазерного излучения различных красителей. В представленной работе приведены результаты исследования влияния НЧ серебра на спектрально-люминесцентные и генерационные свойства полиметинового красителя (ПК).

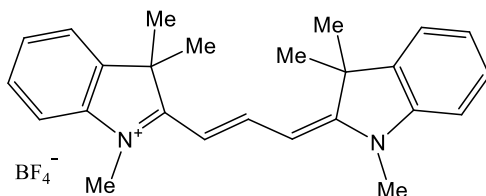


Рис. 1. Структурная формула катионного полиметинового красителя

Спектр поглощения и флуоресценции этанольного раствора красителя имеет максимумы на 546 и 572 нм соответственно.

НЧ в этиловом спирте получены абляцией мишени серебра второй гармоникой твердотельного Nd:YAG лазера по методике [1-3]. При добавлении в спиртовой раствор красителя НЧ серебра положение полос поглощения и флуоресценции и их полуширины остаются неизменными при всех использованных концентрациях НЧ (от концентрации 10^{-13} до $6 \cdot 10^{-12}$ моль/л). Это указывает на отсутствие дополнительной агрегации молекул красителя, связанной с НЧ серебра и отсутствие образования комплексов наночастица–краситель. Наибольшее усиление поглощения и флуоресценции наблюдается при концентрации НЧ серебра $3 \cdot 10^{-12}$ моль/л (на 10 %).

Для раствора красителя без НЧ при плотности мощности источника накачки ниже 11 МВт/см^2 наблюдается лишь спонтанная флуоресценция красителя с полушириной полосы $\sim 30 \text{ нм}$. При достижении плотности мощности накачки значения $11,16 \text{ МВт/см}^2$ на фоне спектра флуоресценции появляется узкая полоса генерации вынужденного излучения и полуширина спектра излучения становится $\sim 7 \text{ нм}$. Дальнейшее увеличение плотности мощности источника накачки приводит к росту интенсивности вынужденного излучения и уменьшению ее полуширины. Добавление НЧ серебра в раствор приводит к росту интенсивности свечения по сравнению со свечением красителя в растворе в отсутствие НЧ. Порог генерации вынужденного излучения полиметинового красителя без НЧ серебра составил $9,8 \text{ МВт/см}^2$. Присутствие НЧ приводит к понижению порога генерации вынужденного излучения красителя на 42 % до величины $5,7 \text{ МВт/см}^2$. При этом полуширина спектра излучения красителя в присутствии НЧ значительно не изменяется.

Список литературы

1. Aimukhanov A.K., Ibrayev N.Kh., Ishchenko A.A., Kulinich A.V. Effect of silver and gold nanoparticles on the spectral and luminescent properties of a merocyanine dye // Theor. Exp. Chem. 2019. V. 54. No. 6. P. 369-374.
2. Afanasyev D.A., Ibrayev N.Kh., Omarova G.S., Kulinich A.V., Ishchenko A.A. Spectral-luminescence and lasing properties of Merocyanine dye solutions in the presence of silver nanoparticles // Opt. Spectrosc. 2020. V. 128. No. 1. P. 61-65.
3. Ibrayev N.Kh., Ishchenko A.A., Afanasyev D.A., Zhumabay N.D. Active laser medium for near-infrared spectral range based on electron-unsymmetrical polymethine dye and silver nanoparticles // Appl. Phys. B. 2019. V. 125. P. 1-7.

А. МУССАУИ¹, Д.В. БУЛЫГА¹, Н.К. КУЗЬМЕНКО¹,
С.К. ЕВСТРОПЬЕВ^{1,2,3}, Р.В. САДОВНИЧИЙ², Н.В. НИКОНОРОВ¹

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург

²Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург

³Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)

СИНТЕЗ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ YAG:RE МЕТОДОМ ПЕЧИНИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛИВИНИЛПИРРОЛИДОНА

Приведены результаты по синтезу нанодисперсных порошков алюмоиттриевого граната, активированного ионами редкоземельных металлов (Ce, Nd, Yb) методом Печини с использованием поливинилпирролидона. Спектральные и структурные характеристики были исследованы при помощи методов люминесцентной спектроскопии, ATR-FTIR спектроскопии и рентгеновской дифрактометрии.

A. MOUSSAOUI¹, D.V. BULYGA¹, N.K. KUZMENKO¹,
S.K. EVSTROPIEV^{1,2,3}, R.V. SADOVNIVHII², N.V. NIKONOROV¹
¹ITMO University, Saint-Petersburg

²S.I. Vavilov State Optical Institute, Saint-Petersburg

³Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University)

SYNTHESIS OF NANOCRYSTALLINE YAG:RE POWDERS VIA PECHINI METHOD USING POLYVINYLPIRROLIDONE

Presents the result of experiments on the synthesis of YAG nanopowders doped with ND, Ce and Yb via Pechini method using polyvinylpyrrolidone. Spectral and structural characteristics were studied by luminescent spectroscopy, ATR-FTIR spectroscopy and X-ray diffraction.

Применение нанокристаллических люминесцентных порошков YAG:RE (RE = Ce³⁺, Yb³⁺, Nd³⁺) имеет перспективы в задачах лазерной техники, а также люминесцентной термометрии. Для материалов на основе YAG характерны высокие люминесцентные свойства и химическая стойкость. Для синтеза нанокристаллических материалов широко применяются жидкостные методы, позволяющие снизить температуру синтеза материалов. К жидкостным относятся такие методы, как гидротермальный синтез, полимерно-солевой метод, а также метод

золь-гель. Свойства и структура наноматериалов зависит от метода синтеза. Целью данной работы являлся синтез нанокристаллического YAG, легированного редкоземельными ионами, методом Печини с использованием поливинилпирролидона (ПВП), который описан в [1].

Были синтезированы несколько образцов порошков Yb:YAG, Ce:YAG и Nd:YAG при различных концентрациях ПВП в исходном растворе. Концентрация легирующих элементов в каждом из образцов 1 %.

Согласно данным РФА увеличение концентрации ПВП в исходном растворе приводит к уменьшению среднего размера кристаллов, рассчитанного по формуле Шеррера. Спектры люминесценции порошков Ce:YAG, Yb:YAG и Nd:YAG представлены на рис. 1. Форма спектров люминесценции синтезированных образцов полностью соответствует форме спектров люминесценции легированных редкоземельными ионами монокристаллов YAG [2 - 4]. Таким образом, синтезированные порошки могут быть использованы в качестве прекурсоров для изготовления лазерной керамики.

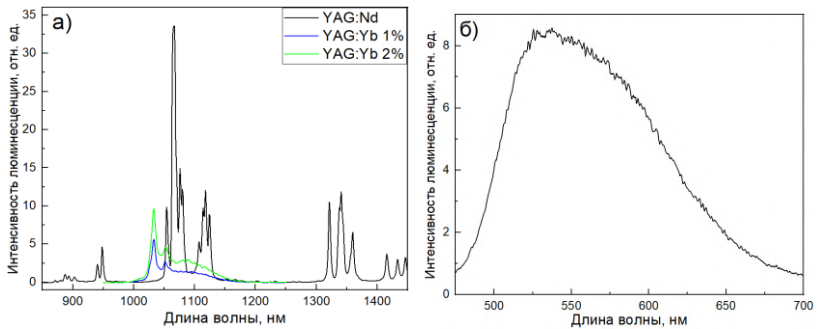


Рис. 1. Спектры люминесценции Yb:YAG и Nd:YAG (а); Ce:YAG (б)

Список литературы

1. Moussaoui A., Bulyga D.V., et al. // *Ceramics International*. 2021. V. 47 (24). P. 34307.
2. Xu X., Zhao Zh., et al. // *Journal of the Optical Society of America B*. 2004. V. 21. P. 543-547.
3. Panahibakhsh S., Bahramian R., et al. // *Journal of Luminescence*. 2020. V. 218. P. 116813.
4. Mihóková E., Nikl M., et al. // *Journal of Luminescence*. 2007. V. 126. P. 77-80.

К.С. РОЖКОВА, А.К. АЙМУХАНОВ, Б.Р. ИЛЪЯСОВ¹,
Д.Н. ТУНГУШБАЕВА

¹*Карагандинский университет им. акад. Е.А. Букетова, Казахстан*

²*Университет информационных технологий Астаны, Нур-Султан, Казахстан*

ВЛИЯНИЕ СПИРТОВОГО РАСТВОРИТЕЛЯ НА ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛЁНОК PEDOT: PSS

Представлены результаты исследования оптических параметров плёнок PEDOT: PSS. Модификация плёнок производилась при помощи добавления в объём полимера PEDOT: PSS различной концентрации спиртовых растворителей. Преимущества свойств модифицированной плёнки PEDOT: PSS были определены путём сравнения оптических спектров поглощения.

X.S. ROZHKOVA, A.K. AIMUKHANOV, B.R. ILYASSOV¹,
D.N. TUNGUSHBAEVA

¹*Buketov Karaganda University, Kazakhstan*

²*Astana IT University, Nur-Sultan, Kazakhstan*

EFFECT OF ALCOHOLIC SOLVENT ON THE OPTICAL CHARACTERISTICS OF PEDOT: PSS FILMS

This paper presents the results of studying the optical parameters of PEDOT: PSS films. The modification of the films was carried out by adding different concentrations of alcohol solvents to the volume of the PEDOT: PSS polymer. The advantages of the properties of the modified PEDOT: PSS film were determined by comparing the optical absorption spectra.

Модификация полимера PEDOT: PSS производилась путём добавления в отфильтрованный исходный раствор PEDOT: PSS (1 %, Ossila Al4083) этилового спирта (в соотношении PEDOT: PSS: Ethanol 1:1), изопропилового спирта (в соотношении PEDOT: PSS: Izopropanol 1:1) и их смеси (в соотношении PEDOT: PSS: Ethanol: Izopropanol 1:0,5:0,5) согласно методике [1]. Плёнки PEDOT: PSS получали на поверхности кварцевого стекла методом центрифугирования (центрифуга SPIN150i) при скорости вращения 5000 об/мин. Регистрация спектров поглощения исследуемых образцов осуществлялась на спектрометре AvaSpec-ULS2048CL-EVO, Avantes (диапазон 200 - 1100 нм, разрешение от 0,04 нм).

На рис. 1 приведены спектры поглощения плёнок исходного и модифицированного спиртовыми растворителями PEDOT: PSS. Из рис. 1 видно, что плёнка исходного PEDOT: PSS имеет максимум на длине волны $\lambda_1 = 237$ нм с полушириной спектра 19,5 нм. В спектрах поглощения всех плёнок наблюдается плечо λ_2 максимумом на 279 нм, связанное с поглощением ароматического фрагмента PSS. После добавления этилового спирта в полимер максимум поглощения плёнки λ_1 не изменился, а полуширина увеличилась и составила 27,5 нм, при этом наблюдается уменьшение поглощения ароматического фрагмента PSS.

При добавлении смешанных спиртовых растворителей в плёнку PEDOT: PSS максимум поглощения плёнки λ_1 не изменяется и составляет 237 нм, полуширина спектра равна 30,9 нм, также незначительно уменьшается плотность ароматического фрагмента PSS. При добавлении только изопропилового спирта в PEDOT: PSS наблюдается увеличение полуширины спектра до 31,1 нм, оптическая плотность PEDOT и PSS также уменьшаются (табл. 1).

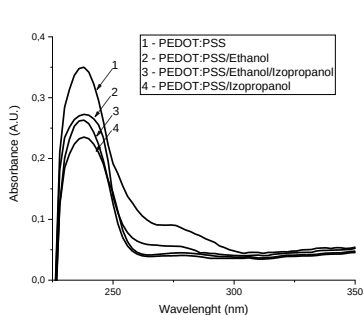


Рис. 1. Спектры поглощения плёнок PEDOT: PSS

Таблица 1

Образец	λ_1 , нм	λ_2 , нм	D_1	D_2	FWHM, нм
PEDOT:PSS	237	279	0,35	0,09	19,5
50% PEDOT:PSS/ 50% ethanol	237	279	0,27	0,06	27,5
50% PEDOT:PSS/ 25% ethanol/25% isopropanol	237	279	0,26	0,05	30,9
50% PEDOT:PSS/ 50% isopropanol	237	279	0,24	0,04	31,1

Наблюдаемые изменения в спектрах поглощения плёнок связаны со структурными особенностями PEDOT: PSS. Добавление спиртовых растворителей приводит к изменению оптических спектров поглощения, связанному со структурными особенностями плёнки вследствие уменьшения части спектра поглощения ароматического фрагмента PSS.

Исследование финансируется Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант № AP08856176).

Список литературы

1. Kim K., Ihm K., Kim B. Surface property of indium tin oxide (ITO) after various methods of cleaning // Acta Physica Polonica A. 2014. V. 127. № 4.

Г.И. ОМАРБЕКОВА, А.К. АЙМУХАНОВ, Б.Р. ИЛЬЯСОВ¹,
Э.Т. НАЖИМХАН

¹*Карагандинский университет им. акад. Е.А. Букетова, Казахстан*

²*Университет информационных технологий Астаны, Нур-Султан, Казахстан*

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТЖИГА
НА МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЁНОК In_2O_3 ,
ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ТЕРМИЧЕСКОГО
ИСПАРЕНИЯ В ВАКУУМЕ**

В данной работе методом термического оксидирования индия были получены плёнки оксида индия (In_2O_3). Оксидирование проводилось в диапазоне температур 200 - 500 °С. С увеличением температуры оксидирования наблюдается увеличение размера зерен.

G.I. OMARBEKOVA, A.K. AIMUKHANOV, B.R. ILYASSOV¹,
A.T. NAZHIMHAN

¹*Buketov Karaganda University, Kazakhstan*

²*Astana IT University, Nur-Sultan, Kazakhstan*

**EFFECT OF ANNEALING TEMPERATURE
ON MORPHOLOGICAL PROPERTIES OF In_2O_3 FILMS
OBTAINED BY THERMAL EVAPORATION METHOD
IN VACUUM**

In this work, indium oxide films (In_2O_3) were obtained by thermal oxidation of indium. Oxidation was carried out in the temperature range 200 - 500 °C. With an increase in the oxidation temperature, an increase in the grain size is observed.

Плёнки In_2O_3 , можно получить методами термического испарения в вакууме [1], распылением ионных пучков [2], лазерным осаждением [3], и другими методами. Среди них можно выделить метод вакуумного термического осаждения так как в этом случае получают плёнки с высокой химической чистотой и с хорошей адгезией на подложке.

Получение плёнок In_2O_3 проводилось испарением порошка In (Sigma-Aldrich, powder, 99.99 % trace metals basis) методом вакуумного термического осаждения на установке CY-1700x-spc-2 (Zhengzhou CY Scientific Instruments Co. Ltd) и последующим отжигом плёнок в атмосфере воздуха при температурах 200 - 500 °С в течение часа. Снимки

топографии поверхности плёнок In_2O_3 получали с помощью растрового электронного микроскопа MIRA 3LMU (TESCAN).

После термического напыления порошка In, полученная плёнка представляет собой металлический индий. Для получения плёнок оксида индия, плёнки напылённого In подвергались отжигу в атмосфере воздуха в диапазоне температур 200 - 500 °C. Температура отжига влияет на кристалличность плёнки In_2O_3 . При этом как показали авторы работы [4] при температуре отжига $T = 200$ °C плёнка имеет аморфную структуру. Когда температура отжига достигает $T = 300$ °C наблюдается переход в поликристаллическую фазу.

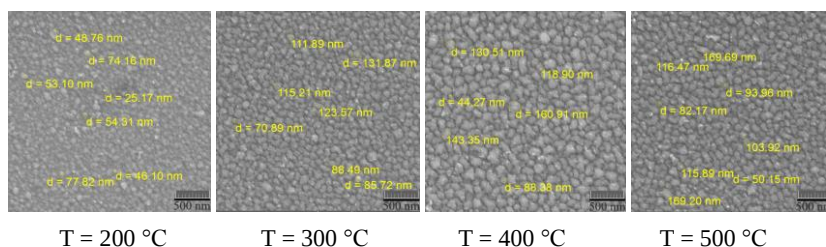


Рис. 1. СЭМ-снимки морфологии поверхности плёнок In_2O_3

На рис. 1 показаны SEM-снимки поверхности изучаемых плёнок. Поверхность при термическом отжиге при $T = 200$ °C имеет зернистую структуру со средним размером зёрен $d \sim 52$ нм. Дальнейшее повышение температуры отжига плёнок 300 – 500 °C (см. рис. 1) приводит к укрупнению размеров зёрен.

Список литературы

1. Pan C.A., Ma T.P. High-quality transparent conductive indium oxide films prepared by thermal evaporation // Appl. Phys. Lett. 1980. V. 37(2). P. 163-165.
2. Cho J.-S., Yoon K.H., Koh S.-K. Material properties of indium oxide films prepared by oxygen ion assisted deposition // J. Appl. Phys. 2001. V. 89(6). P. 3223-3228.
3. Tarsa E.J., De Graef M., Clarke D.R., Gossard A.C., Speck J.S. Growth and characterization of (111) and (001) oriented MgO films on (001) GaAs // J. Appl. Phys. 1993. V. 73(7). P. 3276-3283.
4. Huang W., Zhu B., Chang Sh.Y., Zhu Sh., Cheng P., Hsieh Y.T., Meng L., Wang R., Wang Ch., Zhu Ch., McNeill Ch.R., Wang M., Yang Y. // Nano Lett. 2018.

А.Р. ГАЗИЗОВ^{1,2}, М.Х. САЛАХОВ^{1,2}, С.С. ХАРИНЦЕВ^{1,2}

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет

²Институт прикладных исследований АН Республики Татарстан, Казань

СЕЛЕКТИВНОЕ ОПТОПЛАЗМОННОЕ УСИЛЕНИЕ АНТИСТОКСОВА КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА В ТОНКИХ ПЛЁНКАХ ОКСИДА ГРАФЕНА

В работе проводится моделирование антистоксова комбинационного рассеяния в сплошной тонкой плёнке оксида графена, усиленное благодаря локализованным плазмонным резонансам золотой наночастицы в форме вытянутого сфероида. Показано, что благодаря взаимодействию золотой наноантенны с веществом плёнки, можно достичь селективного усиления интенсивности поля на антистоксовой частоте не затрагивая стоксов сигнал.

A.R. GAZIZOV^{1,2}, M.Kh. SALAKHOV^{1,2}, S.S. KHARINTSEV^{1,2}

¹Kazan Federal University

²Institute of Applied Research of the Tatarstan Academy of Sciences, Kazan

SELECTIVE OPTO-PLASMONIC ENHANCEMENT OF ANTI-STOKES RAMAN SCATTERING IN GRAPHENE OXIDE THIN FILMS

In this work, anti-Stokes Raman scattering is simulated in a continuous thin film of graphene oxide, enhanced by localized plasmon resonances of a gold nanoparticle of elongated spheroidal form. It is shown that due to the electrodynamic interplay between the gold nanoantenna and the graphene oxide film, it is possible to achieve selective enhancement of the anti-Stokes near-field intensity without affecting the Stokes signal.

Одним из способ оптического охлаждения является антистоксово комбинационное рассеяние света (КРС) [1]. При КРС кванты света в веществе рассеиваются либо с рождением фонона (стоксово КРС), либо с поглощением фонона (антистоксово КРС). При комнатных температурах обычно стоксово КРС намного превышает антистоксово. Механизмом усиления КРС могут являться резонансное КРС в полупроводниках [2], плазмонные резонансы в оптических антеннах [3, 4], квазиулевая диэлектрическая проницаемость материала [5] и т.д. В настоящее время за счёт усиления антистоксова КРС было достигнуто охлаждение вещества на 40 К ниже температуры окружающей среды [2].

Целью работы было моделирование эффектов плазмонного усиления КРС в плёнках оксида графена вблизи золотой оптической наночастицы. Диэлектрическая проницаемость оксида графена была взята из работы [6]. Взаимодействие описывается в рамках формализма тензорной функции Грина [4], расширенная методом изображений для поляризуемого шара [7]. Из-за сравнительно большой оптической плотности оксида графена [6] становится существенным его влияние на плазмонный резонанс золотой наночастицы. Благодаря этому влиянию можно реализовать селективное усиление антистоксова КРС (рис. 1) при специальном подборе геометрических параметров золотой наночастицы и оксидной плёнки. Малое поглощение оксида графена в видимой области позволяет рассматривать его в качестве перспективного материала для реализации оптического охлаждения.

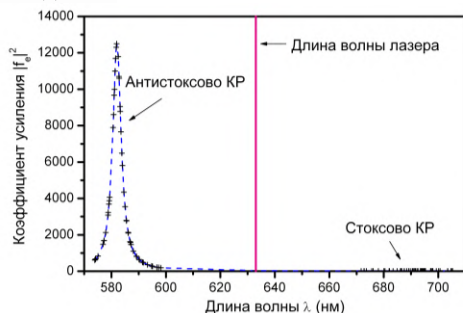


Рис. 1. Зависимость среднего коэффициента усиления интенсивности комбинационного рассеяния от длины волны, вертикальной линией обозначена длина волны падающего света. Знаками «+» обозначены частоты линий спектра комбинационного рассеяния света [8]

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (№ 21-72-00052).

Список литературы

1. Chen Y.-Ch., Bahl G. // Optica. 2015. V. 2. P. 893-899.
2. Zhang J., Li D., Chen R., Xiong Q. // Nature. 2013. V. 493. P.504-508.
3. Gazizov A.R., Salakhov M.K., Kharintsev S.S. // J. Raman Spectrosc. 2020. V. 51. P. 442-451.
4. Газизов А.Р., Харинцев С.С., Салахов М.Х. // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. 2018. Т. 160 (1). С. 61-71.
5. Тюгаев М.Д., Харитонов А.В., Газизов А.Р., и др. // Письма в ЖЭТФ. 2019. Т. 110 (12). С. 772-776.
6. Schöche S., Hong N., Khorasaninejad M., et al. // Appl. Surf. Sci. 2017. V. 421. P. 778-782.
7. Lindell I.V., Sten J.C.-E., Kleinman R.E. // J. Electromagnet. Wave. 1994. V. 8. P. 295-313.
8. Gazizov A.R., Salakhov M.K., Kharintsev S.S. // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 2015. P. 0120441.

Е.В. СЕЛИВЕРСТОВА, Н.Х. ИБРАЕВ

Карагандинский университет им. акад. Е.А. Букетова, Казахстан

ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ АБЛЯЦИИ НА СВОЙСТВА НАНОТОЧЕК НА ОСНОВЕ ВОССТАНОВЛЕННОГО ОКСИДА ГРАФЕНА

Изучено влияние длительности лазерной абляции листов восстановленного оксида графена на их структуру, состав и оптические свойства. Показано, что после 30 минут абляции средний латеральный размер листов rGO уменьшается с $347,4 \pm 86,5$ нм до $98,8 \pm 36$ нм. При этом размеры почти всех частиц находятся в диапазоне до 100 нм, что подтверждено данными СЭМ и динамического светорассеивания. Данные ИК-спектроскопии показали, что во время лазерной абляции происходит структурная модификация rGO. Оптическая плотность растворов rGO и интенсивность их люминесценции также зависят времени аблирования. После аблирования интенсивность флуоресценции rGO выросла в 2 - 3 раза.

E.V. SELIVERSTOVA, N.Kh. IBRAYEV

Buketov Karaganda University, Kazakhstan

INFLUENCE OF THE ABLATION TIME ON THE PROPERTIES OF NANODOTS BASED ON REDUCED GRAPHENE OXIDE

The effect of the laser ablation time of reduced graphene oxide (rGO) sheets on their structure, composition, and optical properties has been studied. It was shown that after 30 minutes of ablation, the average lateral size of rGO sheets decreases from 347.4 ± 86.5 nm to 98.8 ± 36 nm. In this case, the sizes of almost all particles are in the range up to 100 nm, which is confirmed by SEM and dynamic light scattering data. IR spectroscopy data showed that during laser ablation, structural modification of rGO occurs. The optical density of rGO solutions and the intensity of their luminescence also depend on the ablation time. After ablation, the rGO fluorescence intensity was increased in 2 - 3 times.

Восстановленный оксид графена – это одна из разновидностей оксида графена, которая химически модифицирована с целью снижения содержания кислорода. За счёт модификации в восстановленном оксиде графена больше содержание углерода, что будет влиять на его оптические свойства. Для приготовления дисперсии был использован восстановленный оксид графена (rGO, Sigma Aldrich) и этанол в качестве растворителя. Дисперсии были получены следующим образом: 0,6 мг rGO

в 3 мл этанола диспергировали в ультразвуковой ванне в течение 30 минут. После этого дисперсию центрифугировали при 12000 об/мин в течение двух часов. Затем её подвергали облучению твердотельного Nd:YAG лазера с $\lambda_{\text{тен}} = 532$ нм, $\tau_{\text{имп}} = 10$ нс и $E_{\text{имп}} \sim 16$ Дж/см². Время абляции было равно 10, 20 и 30 минутам.

Средний размер частиц rGO после приготовления дисперсии был равен $166,8 \pm 65,1$ нм. После 10 минут абляции размер частиц уменьшается незначительно. При этом более 80 % частиц имеют латеральный размер около $157 \pm 26,2$ нм. Наибольшего изменения размеров частиц можно добиться после 30 минут лазерного облучения дисперсии rGO. Измерения показали, что более 80 % частиц имеют диаметр $98,8 \pm 36$ нм и размеры почти всех частиц находятся в диапазоне до 100 нм. СЭМ-изображения показали, что после аблирования как морфология, так и размеры частиц заметно уменьшаются. При этом морщины и складки в них практически отсутствуют. Для частиц, полученных при аблировании в течении 30 минут средний размер равен $93,2 \pm 47,3$ нм, что близко к значениям, полученным методом динамического светорассеивания.

Данные FTIR-спектроскопии показали, что после абляции интенсивность полос, связанных с деформационными колебаниями O–H и C–O групп, а также колебаниями C–OH групп заметно уменьшается.

Оптическая плотность растворов rGO и интенсивность их люминесценции также зависят времени аблирования. Для всех образцов интенсивность быстрой флуоресценции зависит от длины волны возбуждения и батохромно сдвигается с её увеличением. После аблирования интенсивность флуоресценции rGO выросла в 2 - 3 раза. Время жизни флуоресценции при этом уменьшается как по первой компоненте τ_1 – с 1,36 до 0,71 нс, так и для компоненты τ_2 – с 6,03 до 3,66 нс. В спектре длительного свечения rGO после абляции регистрируется широкая полоса. При фотовозбуждении растворов на 350 нм свечение очень слабое и проявляется на 400 нм. Максимумы спектр длительного свечения rGO до и после 10 минут абляции совпадают и приходятся на 340 нм. Тогда как для 30 минут происходит сдвиг полосы в длинноволновую область спектра почти на 20 нм. Причём интенсивность люминесценции после 30 минут аблирования на 80 % больше по сравнению с неаблированным образцом.

А.Ф. ВАЛИТОВА^{1,2}, А.Р. ГАЗИЗОВ^{1,2}, М.Х. САЛАХОВ^{1,2}

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет

²Институт прикладных исследований АН Республики Татарстан, Казань

ДИСПЕРСИОННЫЕ СООТНОШЕНИЯ ПЛАЗМОННЫХ МОД НА СПЛОШНОЙ ЗОЛОТОЙ МЕТАПОВЕРХНОСТИ С ГЕКСАГОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ

В данной работе исследованы плазмонные свойства и дисперсия мод в тонком плоском слое и волнообразной метаповерхности Au. Нами установлено, что в волнообразной метаповерхности возникают дополнительные оптические моды, дисперсией которых мы можем управлять.

A.F. VALITOVA^{1,2}, A.R. GAZIZOV^{1,2}, M.Kh. SALAKHOV^{1,2}

¹Kazan Federal University

²Institute of Applied Research of the Tatarstan Academy of Sciences, Kazan

DISPERSION RELATIONS OF PLASMON MODES ON A CONTINUOUS GOLD HEXAGONAL METASURFACES

In this paper, the plasmon properties and mode dispersion in a thin flat layer and wavy Au metasurface are investigated. We have established that additional optical modes arise in the metasurface, the dispersion of which can be properly designed.

В работе [1] были исследованы плазмонные моды тонких плёнок TiN, осаждённых при определённых условиях. Использование таких материалов позволяет сфокусировать свет без наложения дополнительных условий на длину волны и поддерживать плазмонные поляритоны [2, 3].

В нашей работе рассмотрена тонкая волнообразная метаповерхность Au, геометрическая форма которой описана в работе [4]. В сплошных метаповерхностях, расположенных на границе опалоподобных фотонных кристаллов, возможно возбуждение поляризационно-чувствительной оптической моды [5]. Дисперсионные соотношения таких метаповерхностей были определены нами методом FDTD с использованием граничных условий Блоха. Набор диполей со случайными фазами и ориентацией был использован в качестве источника излучения в области моделирования. Затем для каждого значения параметра kx граничных условий были найдены частоты, на которых происходит резонанс электромагнитного поля.

Одним из подвидов плазмон-поляритонов являются оптические таммовские состояния. Дисперсионная кривая таммовских плазмон-поляритонов вблизи центра запрещённой зоны фотонного кристалла была приведена в работе [6] с существенными ограничениями на область длин волн и геометрические параметры фотонного кристалла. В результате моделирования мы получили дисперсионные соотношения для мод уединённой волнообразной метаповерхности (при отсутствии фотонного кристалла). В нашей работе мы рассматриваем только первую (основную) зону Бриллюэна. Вблизи границ зоны Бриллюэна групповая скорость дисперсионных кривых стремится к нулю. Для сравнения мы построили дисперсионные соотношения для плоской метаповерхности Au той же толщины (рис. 1а). В случае волнообразной метаповерхности (рис. 1б) наличие периодичности приводит к возникновению дополнительных мод в высокочастотной области, которые аналогичны имеющимся низкочастотным модам. С увеличением толщины метаповерхности Au наблюдается исчезновение низкочастотных чётных мод. Полученные результаты демонстрируют возможность дизайна дисперсии оптических мод с помощью изменения толщины и/или периода волнообразной структуры данной метаповерхности.

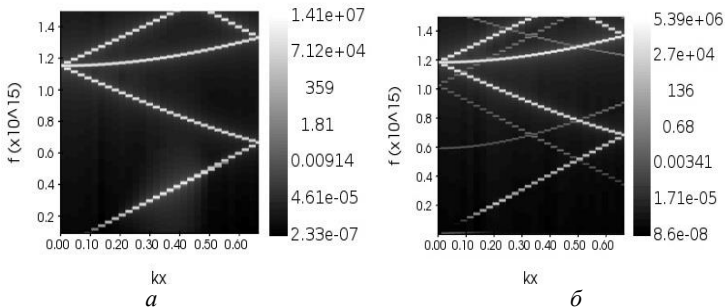


Рис. 1. Дисперсионные соотношения для плоской метаповерхности Au (а) и для волнообразной метаповерхности Au (б) при толщине слоя 40 нм

Список литературы

1. Chaudhary K. et al. // Optics Express. 2020. V. 28. P. 14536-14546.
2. Pendry J.B. // Physical Review Letters. 2000. V. 85. No. 18. P. 3966.
3. Engheta N. // Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE. 2002. V. 1. No. 1. P. 10-13.
4. Valitova A.F., et al. // Optical Materials. 2020. V. 110. P. 110404.
5. Koryukin A.V., et al. // Plasmonics. 2019. V. 14 (4). P. 961-966.
6. Kaliteevski M., et al. // Phys. Rev. B. 2007. V. 76, No. 16. P. 165415.

А.В. ОСАДЧЕНКО^{1,2}, И.А. ЗАХАРЧУК^{1,2}, Д.С. ДАЙБАГЕ^{1,2},
С.А. АМБРОЗЕВИЧ^{1,2}, А.С. СЕЛЮКОВ^{1,2,3}, Н.Ю. ВОЛОДИН⁴,
Д.А. ЧЕПЦОВ⁴, С.М. ДОЛОТОВ⁴, В.Ф. ТРАВЕНЬ⁴

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

³Московский политехнический университет

⁴Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ НОВЫХ ПРОИЗВОДНЫХ КУМАРИНА

Исследованы люминесцентные свойства новых кумариновых красителей, проведено сравнение с кумарином 6. Для соединений с диэтиламиновой группой обнаружен красный сдвиг спектров экстинкции, обусловленный большей полярностью в основном состоянии в растворе. Для новых соединений по результатам спектрально-кинетических измерений не обнаружено подтверждений образования димеров в их растворах в толуоле при сопоставимых концентрациях веществ. Массивные гетероциклические заместители приводят к существенному стоксову сдвигу.

A.V. OSADCHENKO^{1,2}, I.A. ZAKHARCHUK^{1,2}, D.S. DAIBAGYA^{1,2},
S.A. AMBROZEVICH^{1,2}, A.S. SELUKOV^{1,2,3}, N.Yu. VOLODIN⁴,
D.A. CHEPTSOV⁴, S.M. DOLOTOV⁴, V.F. TRAVEN⁴

¹Bauman Moscow State Technical University

²Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

³Moscow Polytechnic University

⁴Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow

LUMINESCENCE OF NOVEL COUMARIN DERIVATIVES

Luminescence properties of new coumarin-based dyes are presented and compared with coumarin 6. For diethylamine-group-bearing compounds, a red shift in the extinction spectra was found, due to their higher polarity in the ground state in solution. For the new compounds, spectral and time-resolved measurements revealed no evidence for the formation of dimers in toluene solutions at comparable concentrations. Massive heterocyclic substituents lead to a significant Stokes shift.

Кумариновые красители применяются в качестве активных сред лазеров [1] и в ОСИД [2]. Исследованы люминесцентные свойства новых кумариновых красителей (Е)-3-(3-(антрацен-9-ил)акрилоил)-2Н-хромен-2-он (соединение 3) и этил 7-(диэтиламино)-2-оксо-2Н-хромен-3-карбоксилат (соединение 2), проведено сравнение с кумарином 6 (соединение 1).

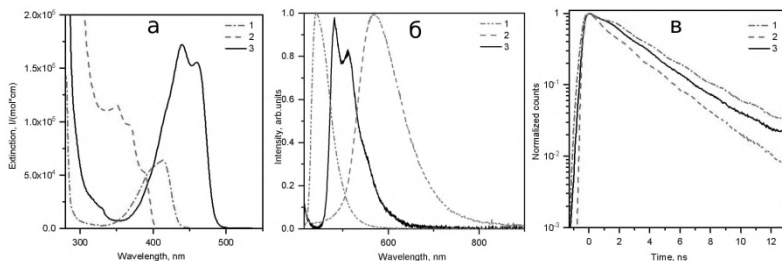


Рис. 1. Спектры экстинкции (а) и флуоресценции (б), кривые затухания (в)

У соединения 2 наблюдался гипсохромный сдвиг относительно соединений 1 и 3 из-за диэтиламиновой группы (рис. 1а). Сложная структура полосы переноса заряда у соединений 1 и 3 – следствие образования димеров. У соединения 1 спектр имеет батохромный сдвиг за счёт большей полярности в основном состоянии, в сравнении с соединениями 2 и 3.

Для соединения 1 стоксов сдвиг 28 нм, для соединения 3 – 22 нм (рис. 1б), что объясняется большей полярностью соединений в возбуждённом состоянии по сравнению с основным. Для соединения 2 стоксов сдвиг 186 нм, что обусловлено сосредоточением электронной плотности в антраценовом заместителе. Большая ширина спектра излучения соединения 2 по сравнению с соединениями 1 и 3 связана с присутствием гетероциклического заместителя на основе антрацена [3]. Наличие двух максимумов в спектре излучения соединения 3 обусловлено агрегацией его молекул в растворе и образованием димеров [4].

Кривые затухания для соединений 1 и 2 аппроксимировались одной экспонентой, а для соединения 3 – двумя (рис. 1в). Такое поведение обусловлено образованием димеров в возбуждённом состоянии [4]. Характерные времена затухания для соединения 3 составили 2,7 и 180 нс, а для соединений 1 и 2 – 3,3 и 2,4 нс. Процесс, соответствующий быстрому времени релаксации для всех трёх веществ – переход $S_1 \rightarrow S_0$.

Спектральные измерения выполнены в рамках проекта РНФ № 17-72-20088-п. Кинетические измерения были проведены при поддержке РФФИ, проект № 20-02-00222_а.

Список литературы

1. Burdukova O., Gorbunkov M., et al. // Appl. Phys. B: Lasers Opt. 2017. V. 123. No. 3. P. 84.
2. Zhang H., Liu X., et al. // Dyes Pigm. 2021. V. 185. P. 108969.
3. Drexhage K.H. // Dye Lasers. 1973. V. 1. P. 144.
4. Chakraborty S., Harris K., Huang M. // AIP Adv. 2016. V. 6. No. 12. P. 125113.

А. МУССАУИ¹, С.К. ЕВСТРОПЬЕВ^{1,2,3}, Н.К. КУЗЬМЕНКО¹,
Н.В. НИКОНОВ¹, Д.В. БУЛЫГА¹, Р.В. САДОВНИЧИЙ²,
А.И. ИГНАТЬЕВ¹

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург

²Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург

³Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД ПЕЧИНИ ДЛЯ СИНТЕЗА НАНОПОРОШКОВ $Gd_2O_3:Nd$

Приведены результаты по синтезу нанопорошков оксида гадолиния, активированного неодимом. Синтез порошков осуществлялся при помощи модифицированного метода Печини. Исследование эволюции материала в ходе термообработки осуществлялось при помощи методов дифференциальной сканирующей калориметрии, рентгеноструктурного анализа и люминесцентной спектроскопии.

A. MOUSSAOUI¹, S.K. EVSTROPIEV^{1,2,3}, N.K. KUZMENKO¹,
N.V. NIKONOROV¹, D.V. BULYGA¹, R.V. SADOVNIVHII²,
A.I. IGNATIEV¹

¹ITMO University, Saint-Petersburg

²S.I. Vavilov State Optical Institute, Saint-Petersburg

³Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University)

MODIFIED PECHINI METHOD FOR SYNTHESIS OF $Gd_2O_3:Nd$ NANOPOWDERS

Presents the result of experiments on the synthesis of gadolinium oxide nanopowders doped with neodymium via modified Pechini method. The evolution of the materials during thermal treatment was studied using differential thermal analysis, X-ray diffraction and luminescent spectroscopy.

Нанокристаллические материалы на основе оксида гадолиния демонстрируют хорошие люминесцентные свойства, обладают высокой химической и термической стойкостью [1]. Целью данной работы являлся синтез нанокристаллических порошков $Gd_2O_3:Nd$ при помощи модифицированного метода Печини с использованием поливинилпирролидона (ПВП) [2]. Суть метода заключается в следующем. Водный раствор, содержащий нитраты неодима и гадолиния,

лимонную кислоту и ПВП при интенсивном перемешивании подвергается нагреванию до 70 °С в течение двух часов, затем полученный гель высушивается и подвергается термообработке в муфельной печи при температуре 600 - 1000 °С.

В ходе синтеза были получены порошки $Gd_2O_3:Nd$ со средним размером нанокристаллов около 30 нм (расчёт выполнен по формуле Шеррера). На рис. 1 представлены спектры люминесценции полученных образцов. Добавление ПВП в ходе синтеза приводит к сужению полос люминесценции неодима в порошках, синтезированных при температуре 600 °С, что свидетельствует о повышении их кристалличности. Для образцов, синтезированных при 1000 °С, такого различия не наблюдается. Поливинилпирролидон также оказывает влияние на морфологию частиц порошков и способствует их пространственному разделению.

Таким образом, применение метода, описанного в данной работе, позволяет улучшить морфологию синтезируемых порошков $Gd_2O_3:Nd$, а также понизить температуру синтеза.

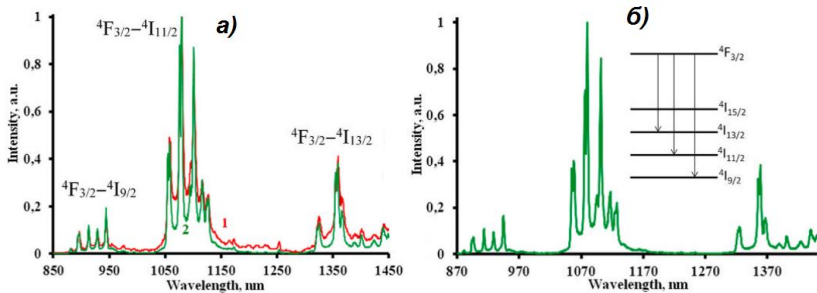


Рис. 1. Спектры люминесценции порошков $Gd_2O_3:Nd$, синтезированных при $T = 600$ °С (кривая 1 – без ПВП, кривая 2 – с ПВП) (а); при $T = 1000$ °С с ПВП (б)

Список литературы

1. Matrosova A.S., et. al. // Optical Fiber Technology. 2021. V. 65. P. 102547.
2. Moussaoui A., Bulyga D.V., et. al. // Ceramics International. 2021. V. 47 (24). P. 34307.

Е.И. КОНСТАНТИНОВА¹, В.А. СЛЕЖКИН^{1,2}, В.В. БРЮХАНОВ²

¹Калининградский государственный технический университет

²Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград

**ВЛИЯНИЕ РАССЕИВАЮЩИХ НАНОЧАСТИЦ TiO_2
НА ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ ПЛЁНОК
ПОЛИВИНИЛБУТИРАЛЯ С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ
 CdZnSeS/ZnS И МОЛЕКУЛАМИ ЭОЗИНА**

В настоящей работе представлены результаты оптического исследования влияния рассеивающих наночастиц TiO_2 на фотолюминесценцию плёнок поливинилбутираля, допированных квантовыми точками CdZnSeS/ZnS и молекулами эозина.

E.I. KONSTANTINOVA¹, V.A. SLEZHKIN^{1,2}, V.V. BRYUKHANOV²

¹Kaliningrad State Technical University

²Immanuel Kant Baltic Federal State University, Kaliningrad

**EFFECT OF SCATTERING TiO_2 NANOPARTICLES
PHOTOLUMINESCENCE OF POLYVINYL BUTYRAL FILMS
WITH CdZnSeS/ZnS QUANTUM DOTS AND EOSIN MOLECULES**

This paper presents the results of an optical study of the effect of TiO_2 scattering nanoparticles on the photoluminescence of polyvinylbutyral films doped with CdZnSeS/ZnS quantum dots and eosin molecules.

Создание композитные материалов является актуальной задачей опто- и фотоэлектроники. Среди известного ряда функциональных наполнителей композитов особое место занимает нанодисперсный TiO_2 , поскольку обладает хорошей фотокаталитической активностью, высокой химической и термической стабильностью, нетоксичностью и низкой себестоимостью [1 - 3]. Плёночные композитные материалы на основе квантовых точек CdZnSeS/ZnS также широко используются в оптоэлектронике в качестве преобразователей излучения [4 - 6]. Однако в результате потерь, приходящимися на внутреннее отражение и перепоглощение, их эффективность меньше, чем ожидалась. Поскольку рассеяние может изменять оптический путь и угол падающего излучения, то представляло интерес исследовать влияние наночастиц (НЧ) TiO_2 ($R = 100$ нм) на фотолюминесценцию плёнок поливинилбутираля (ПВБ),

допированных квантовыми точками (КТ) CdZnSeS/ZnS и молекулами эозина.

Плёнки ПВБ толщиной 10 мкм получали методом налива на предметное стекло смеси компонентов. После высыхания в течение 36 часов образцы изучались методами электронной, флуоресцентной и рамановской и ИК-спектроскопии. Эксперимент проводился при комнатной температуре и температуре жидкого азота.

Анализ спектров образцов показал, что вместе с увеличением концентрации НЧ наблюдается нелинейный рост интенсивности отражения и флуоресценции КТ ($C = 2,6 \cdot 10^{-5}$ моль/л) и молекул эозина ($C = 3,1 \cdot 10^{-4}$ моль/л), при этом флуоресценция эозина увеличивалась в 2,3 раза, а КТ – в 2,8. Кроме того, в образцах с молекулами эозина при возбуждении импульсной ксеноновой лампой ($\lambda = 405$ нм, $\tau < 200$ пс) также регистрировалось увеличение замедленной флуоресценции и фосфоресценции в 2 и 0,6 раз соответственно.

В спектрах комбинационного рассеяния, полученных при фотовозбуждении твердотельным лазером ($\lambda = 455$ нм), наблюдалась генерация фотолюминесценции молекул эозина и квантовыми точками, которая при увеличении концентрации НЧ только разгоралась.

Полагаем, что увеличение свечения плёнок происходит за счёт усиленного поглощения органических молекул и КТ, которое, в свою очередь, являлось результатом многократного отражения падающего излучения от НЧ.

Список литературы

1. Gupta S.M., Tripathi M. // Physical Chemistry. 2011. V. 56. P. 1639-1657.
2. Muneer M. B-A., et. al. // Int. J. Electrochem. Sci. 2012. V. 7. P. 4871-4888.
3. Cantarella M., et. al. // Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 2016. V. 321. P. 1-11.
4. Li Y., et. al. // Mater. Chem. C. 2019. V. 7. P. 3154.
5. Zhang H., Chen S., Sun X.W. // ACS Nano. 2018. V. 12. P. 697.
6. Boonsin R., et. al. // ACS Photonics. 2018. V. 5. P. 462.

Д.С. ДАЙБАГЕ^{1,2}, А.В. ОСАДЧЕНКО^{1,2}, И.А. ЗАХАРЧУК^{1,2},
С.А. АМБРОЗЕВИЧ^{1,2}, А.С. СЕЛЮКОВ^{1,2,3}, А.С. ПЕРЕПЕЛИЦА⁴,
М.С. СМІРНОВ⁴, О.В. ОВЧИННИКОВ⁴

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

³Московский политехнический университет

⁴Воронежский государственный университет

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОЛЛОИДНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК Ag₂S ВО ВНЕШНЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Приведены результаты экспериментов по исследованию влияния внешнего электрического поля (0 - 240 кВ/см) на люминесцентные свойства квантовых точек Ag₂S в органической матрице. Показано, что с увеличением напряжённости электрического поля происходит снижение интенсивности и увеличение скорости релаксации люминесценции, связанной с поверхностными состояниями. Обнаруженные явления вызваны опустошением ловушек под воздействием поля и препятствованием образованию локализованных экситонов.

D.S. DAIBAGYA^{1,2}, A.V. OSADCHENKO^{1,2}, I.A. ZAKHARCHUK^{1,2},
S.A. AMBROZEVIICH^{1,2}, A.S. SELYUKOV^{1,2,3}, A.S. PEREPELTSIA⁴,
M.S. SMIRNOV⁴, O.V. OVCHINNIKOV⁴

¹Bauman Moscow State Technical University

²Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

³Moscow Polytechnic University

⁴Voronezh State University

OPTICAL PROPERTIES OF COLLOIDAL Ag₂S QUANTUM DOTS IN EXTERNAL ELECTRIC FIELD

The result of experiments on the study of the effect of an external electric field (0 - 240 kV/cm) on the luminescence properties of Ag₂S quantum dots in an organic matrix are presented. It is shown that with an increase in the electric field, the trap-state luminescence intensity is decreased with an increase in the relaxation rate. The observed phenomena are related to the charge carried detrapping under the electric field and the prevention of the formation of localized excitons.

Квантовые точки (КТ) применяются в создании органико-неорганических светоизлучающих диодах [1]. Кроме того, КТ также могут применяться в медицине, биологии, оптоэлектронике, других областях [2].

Во внешнем поле (ЭП, E) исследована фотолюминесценция (ФЛ) коллоидных КТ Ag_2S , покрытых 2-меркаптопропионовой кислотой [3].

При поглощении (рис. 1а) наблюдается особенность в области 700 нм, соответствующая экситонному переходу – следствие эффекта размерного квантования. Средний размер КТ по оценкам, аналогичным [4], составляет $\sim 2,7$ нм, что подтверждает анализ данных ПЭМ (вставка).

Наблюдается полоса люминесценции (рис. 1б), связанная с рекомбинацией носителей зарядов на дефектных энергетических уровнях [4], с максимумом на 860 нм и полушириной ~ 180 нм. С увеличением E от 0 до 240 кВ/см происходит снижение интегральной интенсивности ФЛ на 25 % (вставка), что обусловлено опустошением ловушек и препятствованием образованию локализованных экситонов [4].

Кривые затухания ФЛ (рис. 1в) аппроксимировались суммой четырёх экспонент. Характерные времена затухания при напряжённости поля 0, 120 и 240 кВ/см, составили 47,2, 37,7 и 38,1 нс. Уменьшение среднего времени затухания ФЛ во внешнем ЭП также подтверждает сделанное выше предположение.

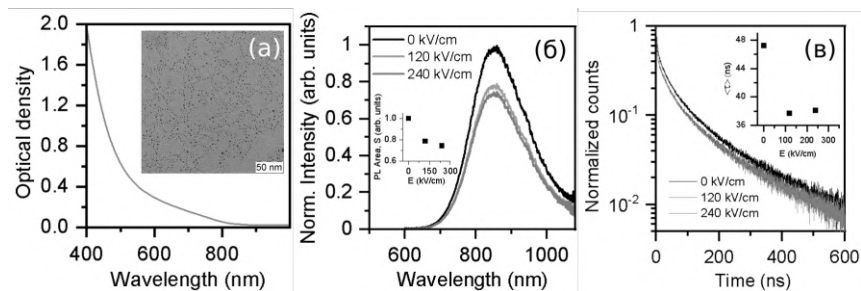


Рис. 1. Спектр поглощения КТ Ag_2S в органической плёнке и их ПЭМ-изображение (а), спектры ФЛ КТ Ag_2S при различных E и зависимость интегральной интенсивности ФЛ от E (б), кривые затухания ФЛ КТ Ag_2S при различных E и зависимость среднего времени затухания от E (в)

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 17-72-20088-п.

Список литературы

1. Sun Y., Jiang Y., Sun X.W., Zhang S., Chen S. // Chem. Rec. 2019. V. 19. P. 1729.
2. Bera D., Qian L., Tseng T.K., Holloway P.H. // Materials. 2010 V. 3. P. 2260.
3. Ovchinnikov O.V., Aslanov S.V., Smirnov M.S., et al. // RSC Adv. 2019. V. 9. P. 37312.
4. Smirnov M.S., Ovchinnikov O.V. // J. Lumin. 2020. V. 227. P. 117526.

И.М. КРОЛЬ, О.П. БАРИНОВА, М.П. ЗЫКОВА

Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва

ВЛИЯНИЕ ИОНОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ НА ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИНК БОРОСИЛИКАТНОГО СТЕКЛА ЭВТЕКТИЧЕСКОГО СОСТАВА

Новый оптический материал для светофильтров в видимой и УФ-области получен на основе легкоплавкого цинк боросиликатного стекла эвтектического состава, содержащий ионы переходных металлов. Исследованы спектры поглощения в области 190 - 1100 нм. Высокая интенсивность полос поглощения и оптическое качество полученного стекла указывают на перспективность применения данных материалов в качестве светофильтров.

I.M. KROL, O.P. BARINOVA, M.P. ZYKOVA

Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow

INFLUENCE OF TRANSITION METAL IONS ON THE OPTICAL CHARACTERISTICS OF ZINC BOROSILICATE GLASS OF EUTECTIC COMPOSITION

A new optical material for light filters in the visible and UV region was obtained on the basis of low-melting zinc borosilicate glass of eutectic composition, containing transition metal ions. The absorption spectra in the range 190 - 1100 nm are investigated. The high intensity of absorption bands and the optical quality of the obtained glass indicate that these materials are promising for use as light filters.

Стекловидные материалы традиционно применяются в качестве светофильтров и других оптически активных элементов для фотоники [1, 2]. Это обусловлено простотой получения стёкол по сравнению с монокристаллами, стабильными физическими свойствами, химической стойкостью, устойчивостью к воздействию излучения. Особенностью цинкборосиликатного стекла состава $65\text{ZnO} - 25\text{B}_2\text{O}_3 - 10\text{SiO}_2$ является возможность получения кристаллических фаз бората ($\text{Zn}_4\text{B}_6\text{O}_{13}$) и силиката (Zn_2SiO_4) цинка.

В работе объектами исследования служили цинкборосиликатные стёкла, легированные ионами Mn^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} и Co^{2+} . Стекло получали в электрической печи при температуре 1150 °С, варка стекла занимала

120 минут. Образцы стёкол получали прессованием вырабатываемого на металлическую поверхность стекла. Термообработку полученных образцов для снятия термических напряжений проводили при 590 °С в течение 2,5 часов. Спектры (рис. 1) получали при помощи Cary 5000 UV-Vis-NIR spectrophotometer (Agilent Technologies Inc., USA).

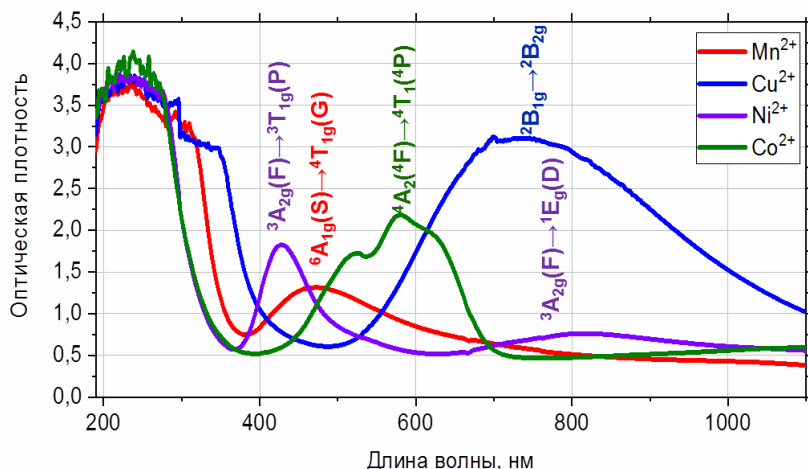


Рис. 1. Спектры поглощения в диапазоне 190 - 1100 нм цинкборосиликатных стёкол, легированных ионами Mn^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} и Co^{2+}

В стекле, содержащем ионы меди, полоса ${}^2\text{B}_{1g} \rightarrow {}^2\text{B}_{2g}$ обусловлена ионом Cu^{2+} в октаэдрической координации с сильным тетрагональным искажением. Ион Co^{2+} в данном стекле преимущественно находится в тетракоординированном состоянии, а полоса поглощения на 580 нм может быть отнесена к переходу ${}^4\text{A}_2({}^4\text{F}) \rightarrow {}^4\text{T}_1({}^4\text{P})$. В содержащем ионы Ni^{2+} стекле интенсивная полоса поглощения при 427 нм относится к разрешённому по спину переходу ${}^3\text{A}_{2g}(\text{F}) \rightarrow {}^3\text{T}_{1g}(\text{P})$, а широкая полоса поглощения при 812 нм к запрещённому по спину переходу ${}^3\text{A}_{2g}(\text{F}) \rightarrow {}^1\text{E}_g(\text{D})$, координация никеля октаэдрическая. Ион Mn^{2+} характеризуется полосой поглощения на 475 нм ${}^6\text{A}_{1g}(\text{S}) \rightarrow {}^4\text{T}_{1g}(\text{G})$ и также октаэдрической координацией.

Список литературы

1. Thulasiramudu A., Buddhudu S. // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2006. V. 102. № 2. P. 212-227.
2. Li M., et al. // Advanced Materials Research. 2013. V. 683. P. 42-45.

В.А. СТАМБОЛЯН, В.А. АСЕЕВ

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВОК НА СПЕКТРЫ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В ИТТЕРБИЙ-ЭРБИЕВЫХ ГЕРМАНАТНЫХ СТЕКЛАХ

Приведены результаты исследования влияния добавок на спектры люминесценции щелочных германатных стёкол и керамик, а также зависимость спектров стёкол без добавок при концентрации эрбия 0,25, 0,5, 1, 2 мол. %.

V.A. STAMBOLYAN, V.A. ASEEV

ITMO University, Saint-Petersburg

STUDY OF THE EFFECT OF ADDITIVES ON THE LUMINESCENCE SPECTRA OF Yb³⁺/Er³⁺-CODOPED GERMANATE GLASSES

Presents the results of studying the effect of additives on the luminescence spectra of alkali-germanate glasses and ceramics and the dependence of the spectra of glasses without additives at an erbium concentration of 0.25, 0.5, 1, 2 mol. %.

В схеме эксперимента используется лазер с длиной волны 915 нм, свет от которого проходит через модулятор, затем фокусируется на образце, а люминесценция стекла фокусируется линзой на монохроматоре и попадает на приёмник, сигнал которого усиливается и обрабатывается синхронным усилителем. В рамках данной работы исследованы щелочные германатные стёкла и керамики. В их состав входят $\text{GeO}_2\text{-Na}_2\text{O-Yb}_2\text{O}_3\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Er}_2\text{O}_3$. Сверх 100 % добавлены: BaO , Al_2O_3 , Nb_2O_5 , SiO_2 , MgO , P_2O_5 и TiO_2 . Для сравнения используется стекло без добавок с концентрацией эрбия 0,25, 0,5, 1 и 2 мол. %. Спектр при 0,25 мол. % эрбия (рис. 1, слева) состоит из характерной структуры двойных пиков на длинах волн 1540 и 1555 нм, а также двух полос более, чем в четыре раза, меньшей интенсивности с пиковыми длинами волн 1500 и приблизительно 1610 нм. При 1 мол. % интенсивность полос на длинах волн 1500 и 1610 нм возрастает в два раза. Полосы на 1540 и 1555 нм слились в одну, которая смещена в красную область. При 2 мол. % интенсивность побочных пиков незначительно снижается, а полосы на 1540 и 1555 нм вновь становятся различимыми и их интенсивность возрастает.

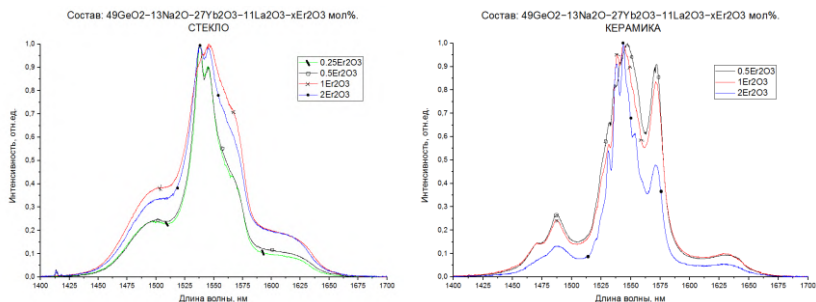


Рис. 1. Зависимость спектра люминесценции без добавок от концентрации Er

Увеличение интенсивности объясняется увеличением количества активных центров, способных принимать энергию с сенсбилизатора. У керамики (рис. 1, справа) три основных интенсивных пика: 1490, 1550 и 1575 нм. С увеличением концентрации Er, например, до 2 мол. % интенсивность боковых пиков снизилась в два раза. Это свидетельствует о вхождении иона активатора в кристаллическую фазу. Влияние добавок на спектр стекла (рис. 2, слева) минимально, однако пик на 1555 нм остается на уровне чистого стекла только с добавками TiO_2 и MgO . SiO_2 практически не влияет на спектр, поскольку Si и Ge строят похожую стеклообразную сетку [1]. У керамики (рис. 2, справа) добавка P_2O_5 приводит к значительному перераспределению интенсивности. Заметное влияние оказывает и PbO : данный ион самый тяжелый, поэтому его влияние на Er максимально.

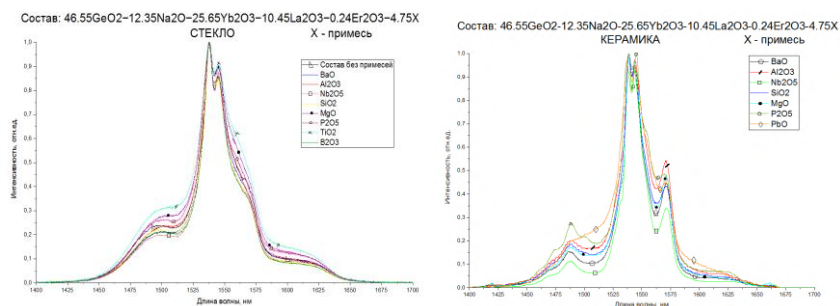


Рис.2. Зависимость спектра люминесценции от добавок

Список литературы

1. Kuzmenko N.K. Study of the influence of additives on the spectral and luminescent properties of alkali-germanate glasses // VIII Congress of Young Scientists. SPb, ITMO.

Н.Х. ИБРАЕВ, Е.В. СЕЛИВЕРСТОВА, А.А. ИЩЕНКО¹

Карагандинский университет им. акад. Е.А. Букетова, Казахстан

¹*Институт органической химии НАН Украины, Киев*

ПЛАЗМОННЫЙ ЭФФЕКТ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА НА СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕТИНОВ РАЗЛИЧНОЙ ИОННОСТИ

Представлены результаты по влиянию плазмонных наночастиц серебра на спектрально-люминесцентные свойства полиметиновых красителей различной ионности. Плазмонный резонанс наночастиц Ag оказывает большее влияние на флуоресценцию анионного красителя, так как наночастицы и краситель имеют отрицательный заряд. Это не позволяет приблизиться молекулам полиметина к плазмонным наночастицам на расстояния, необходимые для эффективного переноса энергии от молекул анионного красителя к наночастицам, что и обуславливает большие коэффициенты усиления флуоресценции, наблюдаемые в эксперименте.

N.Kh. IBRAYEV, E.V. SELIVERSTOVA, A.A. ISHCENKO¹

Buketov Karaganda University, Kazakhstan

¹*Institute of Organic Chemistry of NAS of Ukraine, Kiev*

SILVER NANOPARTICLE EFFECT ON SPECTRAL-LUMINESCENT PROPERTIES OF POLYMETHINES OF VARIOUS IONICITY

Results on the effect of plasmonic silver nanoparticles on the spectral-luminescent properties of polymethine dyes of various ionicity are presented. Plasmon resonance of Ag nanoparticles has a greater effect on the fluorescence of the anionic dye, because nanoparticles and dye are negatively charged. This prevents polymethine molecules from approaching to plasmonic nanoparticles at the distances necessary for efficient energy transfer from anionic dye molecules to nanoparticles. This leads to the large fluorescence enhancement factors observed in the experiment.

В настоящее время практически отсутствуют работы по исследованию влияния ионности красителя на эффективность его взаимодействия с плазмонными наночастицами (НЧ) металлов. Между тем заряд НЧ металлов должен оказывать сильное влияние на заряженную молекулу красителя. В качестве объектов исследования были выбраны полиметиновые красители различной ионности: K1 – катионный; K2 – анионный; M2 – нейтральный красители (рис. 1). Спектры

поглощения и флуоресценции красителей находятся в одной спектральной области (рис. 2).

Концентрация красителей в этанольных растворах была постоянна и равной 10^{-5} моль/л. Концентрация НЧ Ag в растворе красителя изменяли от $5 \cdot 10^{-14}$ до 10^{-11} моль/л). Синтез НЧ Ag диаметром $35,2 \pm 5$ нм был проведён методом лазерной абляции. Зета-потенциал НЧ Ag был измерен на анализаторе Zetasizer Nano ZS (Malvern) и равен -32,72 мВ.

Измерения показали, что с увеличением концентрации НЧ оптическая плотность D красителей возрастает для катионного (на 5 %) и нейтрального красителя (на 25 %). Для анионного красителя существенных изменений D зарегистрировано не было. Интенсивность флуоресценции всех красителей растёт до определённой концентрации НЧ. Дальнейший рост C_{Ag} приводит к тушению свечения. Наибольшее усиление флуоресценции наблюдается при концентрации НЧ Ag $3 \cdot 10^{-12}$ моль/л для K1 (на 10 %), $5 \cdot 10^{-13}$ моль/л для красителя K2 (на 40 %) и 10^{-12} моль/л для M2 (на 4 %). При этом их время жизни флуоресценции практически не изменяется.

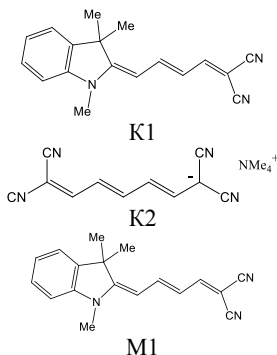


Рис. 1. Структурные формулы красителей

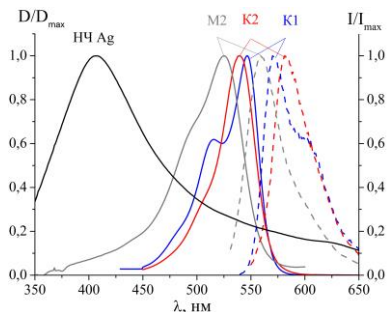


Рис. 2. Спектры поглощения и флуоресценции НЧ Ag и красителей

Полученные НЧ и анионный краситель, для которого было зарегистрировано наибольшее усиление интенсивности, имеют отрицательный заряд. Поэтому можно предположить, что это не даёт приблизиться молекулам K2 к НЧ Ag на расстояние, необходимые для эффективного переноса энергии от молекул анионного красителя к НЧ, что и обуславливает большие коэффициенты усиления флуоресценции, наблюдаемые в эксперименте.

А.П. РУСИНОВ

Оренбургский государственный университет

МЕЖФАЗНАЯ ТЕПЛОВАЯ РЕЛАКСАЦИЯ ПЕРЕХОДНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ГАЗА В ПЛАЗМОННОЙ НАНОЧАСТИЦЕ

Проведено моделирование тепловой релаксации переходного поглощения электронов в разогретой плазмонной наночастице помещённой в однородную среду на основе численного решения уравнения теплопроводности. Показано, что данный процесс можно разделить на этап выравнивания температуры на границе фаз «наночастица – среда» и этап тепловой релаксации в квазиоднородной среде.

A.P. RUSINOV

Orenburg State University

INTERPHASE THERMAL RELAXATION OF TRANSIENT ELECTRON GAS ABSORPTION IN A PLASMONIC NANOPARTICLE

The simulation of thermal relaxation of transient electron absorption in a heated plasmon nanoparticle placed in a homogeneous medium based on the numerical solution of the thermal conductivity equation is carried out. It is shown that this process can be divided into the stage of temperature equalization at the boundary of the "nanoparticle – medium" phases and the stage of thermal relaxation in a quasi-homogeneous medium.

Импульсная лазерная активация приводит к изменению оптических параметров системы [1 - 3], в случае ансамбля наночастиц это переходное поглощение за счёт неупругого взаимодействия разогретой электронной плазмы с зондирующим излучением. Там же показано, что кинетика переходного поглощения связана со скоростью тепловой релаксации электронов в металле. В отличие от [2, 3] в данной работе рассмотрена тепловая релаксация плазмонной наночастицы радиусом R в однородной среде в диапазоне $10^2 - 10^3$ нс, когда процесс электрон-фононной релаксации завершен, и температурное поле в наночастице можно считать пространственно однородным с начальным значением температуры – T_0 . В этом временном диапазоне основное влияние на процесс остывания оказывает теплообмен на границе фаз «наночастица – среда» и последующая релаксация теплового поля в однородной среде.

Температура наночастицы $T_{NP}(t)$ и тепловое поле $T_s(r, t)$ во внешней среде в области $r \leq R$ находится из совместного решения уравнения теплообмена на границе раздела фаз «наночастица – среда» и уравнения теплопроводности с источником в сферических координатах для среды

$$\begin{cases} \frac{\partial T_{NP}(t)}{\partial t} = -k \cdot T_{NP}(t) - T_s(R, t) \\ \frac{\partial T_s(r, t)}{\partial t} = a^2 \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 \frac{\partial}{\partial r} T_s(r, t) + \delta(r - R) f_s(t) \end{cases}$$

где $f(R, t) \sim (T_{NP}(t) - T_s(r, t))$, k – эффективность теплообмена на границе, a^2 – коэффициент температуропроводности среды. Решение данной системы уравнений проводится численно с использованием конечно-разностной схемы.

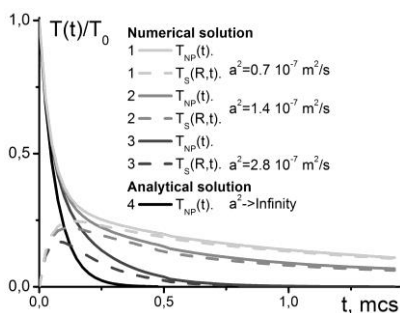


Рис. 1. Тепловая релаксация системы при различных коэффициентах a^2

Из рис. 1 видно, что при остывании наночастицы сначала на границе раздела фаз происходит выравнивание температуры, а затем совместная тепловая релаксация системы в целом. При этом с увеличением отношения a^2/h , более важным фактором, ограничивающим скорость остывания наночастицы, становится теплопередача на границе фаз. В случае $a^2 \rightarrow \infty$ $T_{NP}(t)$ убывает по экспоненте со временем релаксации k^{-1} (кривая 4). Можно видеть, что численные решения

(кривые 1 - 3) с увеличением a^2 в пределе стремятся к ней.

На больших временах теплопередача на границе фаз перестает выполнять «лимитирующую» функцию для процесса тепловой релаксации и динамика теплового поля рассматриваемой гетерогенной системы практически не отличается от случая однородной системы с аналогичным начальным тепловым возмущением.

Список литературы

1. Kucherenko M.G., Rusinov A.P. // Laser Physics. 2006. V. 16 (9). P. 1315-1320.
2. Hartland G.V. // Chem. Sci. 2010. V. (1). P. 303-309.
3. Yu K., You G., et. al. // J. Phys. Chem. C. 2011. V. 115. P. 3820-3826.

М.Г. КУЧЕРЕНКО, В.М. НАЛБАНДЯН

Оренбургский государственный университет

СПЕКТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ДВУХЧАСТИЧНОГО КОМПЛЕКСА ИЗ КВАНТОВОЙ ТОЧКИ И КОМПОЗИТНОЙ НАНОЧАСТИЦЫ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ЯДРОМ

Построена спектральная модель люминесценции двухкомпонентной системы «экситон-активированная квантовая точка – слоистая плазменная наночастица с металлическим ядром и диэлектрической оболочкой» во внешнем магнитном поле с учётом неоднородности квазистационарного электрического поля, создаваемого квантовой точкой в области слоистой наночастицы.

M.G. KUCHERENKO, V.M. NALBANDYAN

Orenburg State University

EMISSION SPECTRA OF A TWO-PARTICLE COMPLEX FROM A QUANTUM DOT AND A COMPOSITE NANOPARTICLE WITH A METAL CORE

A spectral model of luminescence of a two-component system "exciton-activated semiconductor quantum dot – layered plasma nanoparticle with a metal core and a dielectric shell" in an external magnetic field is constructed, taking into account the inhomogeneity of the quasi-stationary electric field created by the quantum dot in the region of the layered nanoparticle.

В работе [1] была предложена теоретическая модель электронных процессов в композитной системе квантовая точка (КТ) – плазменная наночастица (НЧ), в рамках которой исследован механизм радиационных и безызлучательных процессов в системе, с учётом неоднородности ближнего поля и анизотропных характеристик мультипольных поляризуемостей наночастицы. В отличие от [1], в данной работе рассмотрена система из слоистой НЧ с проводящим ядром и диэлектрической оболочкой.

Отождествляемая с сигналом люминесценции спектральная плотность N числа фотонов, испущенных объединённой системой «квантовая точка – слоистая наночастица» на частоте ω имеет вид [2]

$$N(\omega | \mathbf{B}, r_0) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{w_{sp}^2(\omega | \mathbf{B}, r_0) \Gamma(\omega | \mathbf{B}, r_0)}{(\omega - \omega_f)^2 + \Gamma^2(\omega | \mathbf{B}, r_0)}, \quad (1)$$

где $\Gamma(\omega | \mathbf{B}, r_0) = w_{sp}(\omega | \mathbf{B}, r_0) + U(\omega | \mathbf{B}, r_0) + K$ – функция спектральной ширины лоренцевой линии люминесценции; $w_{sp}(\omega | \mathbf{B}, r_0)$ – скорость спонтанной эмиссии КТ, расположенной вблизи НЧ на расстоянии r_0 от её центра; $U(\omega | \mathbf{B}, r_0)$ – скорость безызлучательной передачи энергии от КТ к НЧ, K – постоянная скорость распада возбуждённой КТ в отсутствие НЧ, $\mathbf{B}$ – вектор индукции внешнего магнитного поля.

В результате проведённых расчётов по формуле (1) получены спектры люминесценции двухчастичного комплекса в зависимости от оптических и геометрических параметров системы. На рис. 1 наблюдаются две спектральные полосы (кривая 1): низкочастотная полоса отвечает резонансной частоте перехода ω_{if} в КТ, высокочастотная – плазмонному резонансу металлической слоистой НЧ. При постепенном приближении ω_{if} к частоте плазмонного резонанса, интенсивность спектра излучения наносистемы возрастает, а при совпадении частот (кривая 3), спектральная амплитуда увеличивается на два порядка.

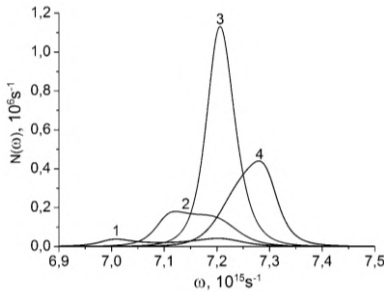


Рис. 1. Зависимость спектра люминесценции системы «слоистая НЧ – КТ» от резонансной частоты перехода ω_{if} КТ, значения ω_{if} : 1 – $7 \cdot 10^{15}$, 2 – $7,1 \cdot 10^{15}$, 3 – $7,2 \cdot 10^{15}$, 4 – $7,4 \cdot 10^{15}$ с⁻¹

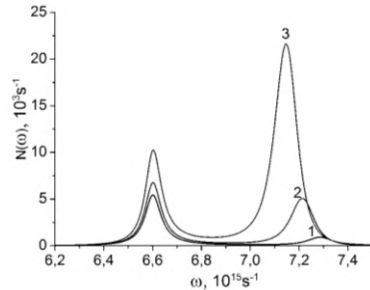


Рис. 2. Зависимость спектра люминесценции системы «слоистая НЧ – КТ» от радиуса ядра наночастицы R_1 : 1 – 4, 2 – 5, 3 – 6 нм

С увеличением радиуса ядра R_1 слоистой наночастицы, при постоянной толщине оболочки, в спектре люминесценции заметно увеличение амплитуды обеих спектральных полос (рис. 2), при этом в высокочастотной области спектра наблюдается постепенное уменьшение резонансной частоты.

Список литературы

1. Кучеренко М.Г., Налбандян В.М. // Опт. и спектр., 2020. Т. 128. № 11. С. 1776-1783.
2. Кучеренко М.Г., Налбандян В.М. // Матер. Всеросс. науч.-метод. конф. «Универс. комплекс как регион. центр образования, науки и культуры». Оренбург, 2021. С. 2427-2435.

А.В. ГОРБАТОВА, А.М. БУРЯКОВ, М.С. ИВАНОВ,
Е.Д. МИШИНА, Ж. ЛОНГ¹

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

¹*Университет Монпелье, Франция*

НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКАЯ МИКРОСКОПИЯ МОЛЕКУЛЯРНЫХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ

В работе продемонстрирован универсальный подход для исследования фундаментальных свойств любых молекулярных сегнетоэлектрических систем: фазовых переходов и характера сегнетоэлектрической поляризации (одноосная / многоосная). Методом нелинейно-оптической микроскопии исследована кристаллическая симметрия молекулярного соединения $ZbYb$, подтверждён одноосный характер сегнетоэлектрической поляризации и наличие фазового перехода при температуре $T_c = 473$ К.

A.V. GORBATOVA, A.M. BURYAKOV, M.S. IVANOV,
E.D. MISHINA, J. LONG¹

MIREA – Russian Technological University, Moscow

¹*Montpellier University, France*

NONLINEAR OPTICAL MICROSCOPY OF MOLECULAR FERROELECTRICS

This work demonstrates a universal approach for studying the fundamental properties of any molecular ferroelectric systems: phase transitions and the nature of ferroelectric polarization (uniaxial / multiaxial). The crystal symmetry of the molecular compound $ZbYb$ was investigated by nonlinear optical microscopy, the uniaxial nature of the ferroelectric polarization and the presence of a phase transition at a temperature of $T_c = 473$ K were confirmed.

В связи с растущими глобальными проблемами экологии и энергосбережения большое внимание уделяется молекулярным органическим сегнетоэлектрикам [1]. Благодаря своим уникальным свойствам: лёгкости, гибкости, экологической чистоте, биосовместимости, а также высокой технологичности они оказались на передовой материаловедения [1, 2]. Используя подходы мягкой химии можно легко манипулировать конечными свойствами таких материалов, значительно расширяя их функционал и открывая новые возможности применения [2]. Однако лишь немногие молекулярные сегнетоэлектрики

демонстрируют свои сегнетоэлектрические свойства при комнатной температуре, что затрудняет их использование [3, 4].

Недавно мы показали сильное магнитоэлектрическое взаимодействие в молекулярном комплексе ZnYb , проявляющем парамагнитные и сегнетоэлектрические свойства при комнатной температуре [5]. Данная работа представляет собой дальнейшее фундаментальное исследование нелинейно-оптических свойств, фазовых переходов, а также характера сегнетоэлектрической поляризации (одноосная/многоосная) в соединении ZnYb .

Методом нелинейно-оптической микроскопии исследована анизотропия и температурная зависимость сигнала второй гармоники в комплексе ZnYb . Определены компоненты тензора нелинейной восприимчивости, а также температура перехода в параэлектрическую фазу $T_c = 473$ К. В соответствии с теорией Айзу [6] мы предполагаем, что для соединения ZnYb характерен фазовый переход $222 \rightarrow 2$, который свойственен одноосным сегнетоэлектрическим системам.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-79-10233).

Список литературы

1. Zhang H.-Y. et al. // *Angew. Chemie*. 2018. V. 130. No. 2. P. 535-539.
2. Tayi A.S. et al. // *Nat. Chem*. 2015. V. 7, No. 4. P. 281-294.
3. Zhang W., Xiong R.-G. // *Chem. Rev*. 2012. V. 112. No. 2. P. 1163-1195.
4. Li P.-F. et al. // *Proc. Natl. Acad. Sci*. 2019. V. 116, No. 13. P. 5878-5885.
5. Long J. et al. // *Science*. 2020. V. 367. No. 6478. P. 671-676.
6. Aizu K. // *Phys. Rev. B*. 1970. V. 2. No. 3. P. 754-772.

С.А. ПЕНЬКОВ, А.А. ПИСКУНОВ
Оренбургский государственный университет

ФЛУОРЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОГЕННЫХ КОЛЛОИДНЫХ РАСТВОРОВ АНТРАЦЕНА И СЕРЕБРА

Исследованы флуоресцентные и абсорбционные свойства гетерогенных коллоидных растворов антрацена и серебра.

S.A. PENKOV, A.A. PISKUNOV
Orenburg State University

FLUORESCENT PROPERTIES OF HETEROGENEOUS COLLOIDAL SOLUTIONS OF ANTHRACENE AND Ag

The fluorescent and absorption properties of heterogeneous colloidal solutions of anthracene and Ag were investigated.

Исследованиям свойств наночастиц молекулярных кристаллов посвящено множество работ в разных областях, таких как оптика и фотоника, сенсорики, медицина и биология. Такой интерес исследователей, прежде всего, обусловлен сочетанием размеров и специфических электрических и оптических свойств молекулярных кристаллов. Кроме этого, эти материалы характеризуются наличием в них процесса триплет-триплетной аннигиляции, который в свою очередь часто используется в преобразователях цвета излучения.

В ходе данной работы были получены водные коллоидные растворы нанокристаллов антрацена и серебра, а также твёрдые растворы данных наночастиц в ПВС. Полученные образцы растворов и плёнок с различным соотношением наночастиц исследованы методами оптической спектроскопии и динамического рассеяния света. Наночастицы антрацена получали с использованием метода переосаждения, описанного ранее [1 - 3]. Наночастицы серебра получали химически при стабилизации наночастиц борогидридным методом [4]. Размеры нанокристаллов антрацена лежали в более широком диапазоне и составили около 160 нм, тогда как наночастицы серебра имели более узкое распределение с центром в 40 нм. Спектры флуоресценции водных коллоидных растворов антрацена и серебра, возбуждённые излучением УФ-светодиода с длиной волны 380 нм и представленные на рис. 1, показали свечение с

максимумом около 420 нм, свойственное для наночастиц антрацена. Зависимость максимума спектра флуоресценции от концентрации антрацена C_A в качестве прекурсора в иницилирующем спиртовом растворе представлена на рис. 2. Как видно из рисунка, зависимость имеет нелинейный характер с тенденцией уменьшения наклона кривой, тогда как для чистых коллоидных растворов данная зависимость близка к линейной. Таким образом, в ходе работы были получены и исследованы смешанные коллоидные растворы наночастиц антрацена и серебра.

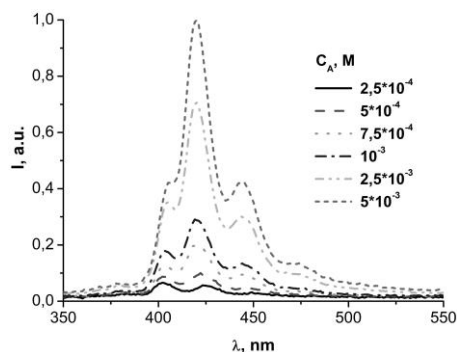


Рис. 1. Спектры флуоресценции водных коллоидных растворов антрацена и серебра при увеличении концентрации антрацена-прекурсора C_A

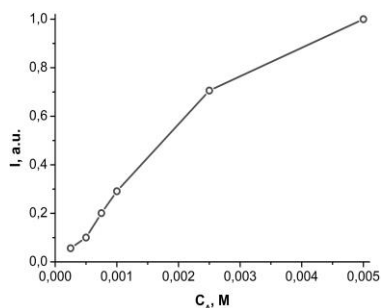


Рис. 2. Зависимость максимума спектра флуоресценции водных коллоидных растворов антрацена и серебра от концентрации антрацена-прекурсора C_A

Список литературы

1. Kasai H., et al. // Jpn. J. Appl. Phys. 1992. V. 31. P. L1132-L1134.
2. Пеньков С.А. // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы Всероссийской научно-методической конференции. 2019. С. 2931-2934.
3. Пеньков С.А., Алимбеков И.Р., Неясов П.П. // IX Международная конференция по фотонике и информационной оптике. Сборник научных трудов. 2020. С. 447-448.
4. Пеньков С.А., Кучеренко М.Г. // VIII Международная конференция по фотонике и информационной оптике. Сборник научных трудов. 2019. С. 473-474.
5. Mulfinger L., Solomon S.D., Bahadory M., Jeyarajasingam A.V., Rutkowsky S.A., Boritz C. // J. Chem. Educ. 2007. V. 84. No. 2. P. 322.

Р.Д. ХАРИСОВА, А.Н. БАБКИНА, К.С. ЗЫРЯНОВА
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СВОЙСТВ ПЕРОВСКИТНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ CsPbI₃ В БОРОГЕРМАНАТНЫХ СТЁКЛАХ

Исследована люминесценция перовскитных нанокристаллов CsPbI₃, полученных в борогерманатном стекле после термообработки при температурах выше температуры стеклования. Люминесценция наблюдалась в области 670 - 710 нм. Спектры свидетельствуют о смещении в красную область полосы люминесценции из-за размерных эффектов при увеличении температуры термообработки.

R.D. KHARISOVA, A.N. BABKINA, K.S. ZYRIANOVA
ITMO University, Saint-Petersburg

INVESTIGATION OF CsPbI₃ PEROVSKITE NANOCRYSTALS LUMINESCENT PROPERTIES IN BOROGERMANATE GLASSES

There was investigated the luminescence of perovskite nanocrystals CsPbI₃ obtained in borogermanate glass after heat treatment at temperatures above the glass transition one. The nanocrystals luminescence bands are in 670 - 710 nm region. The spectra show that the increase of heat treatment temperature leads to red shift of luminescence band because of quantum confinement effect.

Перовскитные нанокристаллы CsPbX₃ (X = Cl, Br, I) в последнее время привлекли много внимания различных научных групп. Благодаря оптическим и фотоэлектрическим свойствам этих нанокристаллов, для них уже придумано множество применений [1]. К сожалению, сами эти нанокристаллы не стабильны на воздухе, подвержены влиянию влаги и температуры, поэтому существует необходимость в поиске различных матриц, защищающих их от воздействий окружающей среды [2]. Одним из видов таких матриц, обеспечивающих наибольшую стабильность, являются стеклянные матрицы. И хотя использование стёкол не допускает применение перовскитов в фотовольтаике, остается большое поле возможностей их использования в качестве люминесцентных материалов и лазерных сред. В этом свете наиболее привлекательными являются нанокристаллы CsPbI₃, обладающие люминесценцией в красной и

ближней ИК-областях, которая на данный момент недостаточно перекрыта существующими люминесцентными материалами.

Целью этой работы является изучение люминесцентных свойств нанокристаллов CsPbI_3 в борогерманатном стекле системы $\text{GeO}_2 - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{ZnO} - \text{Na}_2\text{O} - \text{TiO}_2 - \text{Cs}_2\text{O} - \text{PbO} - \text{KI}$. Для выделения нанокристаллов в объёме готового стекла образцы подвергались термообработке при температуре выше температуры стеклования (около 490°C) в течение часа. Для измерения спектров люминесценции использовался спектрофлуориметр LS-55 Perkin Elmer.

На рис. 1 представлены спектры люминесценции образцов после термообработки. Видно, что при увеличении температуры термообработки полоса люминесценции сдвигается в красную область, что, по-видимому, объясняется увеличением размеров образующихся нанокристаллов. По этой же причине при увеличении температуры термообработки уменьшается величина сдвига полосы люминесценции (рис. 2).

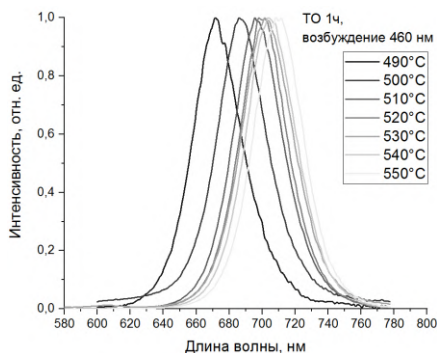


Рис. 1. Спектры люминесценции нанокристаллов CsPbI_3 в стекле, термообработанном в течение 1 часа при температурах $490 - 550^\circ\text{C}$

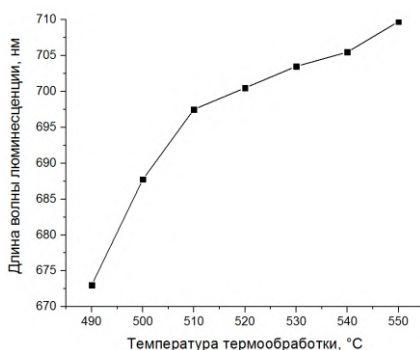


Рис. 2. Зависимость длины волны максимума полосы люминесценции от температуры термообработки

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта НИРМА ФТ МФ Университета ИТМО.

Список литературы

1. Fu P., et al. Perovskite nanocrystals: synthesis, properties and applications // Science Bulletin. 2017. V. 62. No. 5. P. 369-380.
2. Seth S., et al. Tackling the defects, stability, and photoluminescence of CsPbX_3 perovskite nanocrystals // ACS Energy Letters. 2019. V. 4. No/ 7. P. 1610-1618.

А.Д. МОЛЧАНОВА, К.Н. БОЛДЫРЕВ, Л.Н. БЕЗМАТЕРНЫХ¹

Институт спектроскопии РАН, Троицк

¹*Институт физики им. Л.В. Куренского ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск*

ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ НЕЛИНЕЙНОГО КРИСТАЛЛА $YAl_3(BO_3)_4:Mn$

Представлены результаты спектроскопического исследования поглощения, люминесценции и рентгенолюминесценции монокристалла $YAl_3(BO_3)_4:Mn$ в широком диапазоне температур. Сделано предположение о структуре электронных оболочек центров Mn в $YAl_3(BO_3)_4:Mn$.

A.D. MOLCHANOVA, K.N. BOLDYREV, L.N. BEZMATERNYKH¹

Institute for Spectroscopy of the RAS, Troitsk

¹*Kirensky Institute of Physics of FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk*

OPTICAL SPECTROSCOPY OF NONLINEAR $YAl_3(BO_3)_4: Mn$ CRYSTAL

The results of a spectroscopic study of absorption, luminescence, and X-ray luminescence of $YAl_3(BO_3)_4:Mn$ single crystal in a wide temperature range are presented. An assumption regarding the structure of the electron shells of Mn centers in $YAl_3(BO_3)_4: Mn$ was made.

Сложные ортобораты редкоземельных (РЗ) элементов и трёхвалентных катионов описываются общей формулой $RM_3(BO_3)_4$, где $R = Y, La - Lu$, $M = Al, Ga, Cr, Mn, Fe$ и кристаллизуются в структуру минерала хантита $CaMg_3(CO_3)_4$. Кристаллы представляют значительный интерес как нелинейно-оптические, магнитоэлектрические, люминесцентные и лазерные материалы.

Среди них иттрий-алюминиевые бораты $YAl_3(BO_3)_4$ являются известными люминофорами в случае частичного замещения ионов Y^{3+} редкоземельными ионами. $YAl_3(BO_3)_4:Eu^{3+}$ при УФ-возбуждении показывает красную люминесценцию, близкую по координатам хроматичности к параметрам идеального коммерческого люминофора $Y_2O_3:Eu^{3+}$. $YAl_3(BO_3)_4:Eu^{3+}/Tb^{3+}$ представляет собой экологически чистый материал для белого светодиода, выгодный по своей интенсивности, мощности люминесценции и стоимости [1]. При УФ-возбуждении в $YAl_3(BO_3)_4:Sm^{3+}$ и $YAl_3(BO_3)_4:Tm^{3+}$ было получено красновато-оранжевое и синее излучение, соответственно [2, 3]. В $YAl_3(BO_3)_4$, легированных

марганцем, при возбуждении синим, зелёным и УФ-излучением наблюдаются три линии с частотами порядка 680 нм. В работе [4] эта люминесценция была отнесена прежде всего Mn^{4+} , однако мы считаем необходимым проведение дополнительного анализа.

В настоящей работе проведено исследование кристалла $YAl_3(BO_3)_4$ с примесью Mn. Были зарегистрированы спектры поглощения и люминесценции $YAl_3(BO_3)_4:Mn$ в широком диапазоне температур и при различных длинах волн накачки. Также проведены первые исследования рентгенолюминесценция кристалла. Выдвинуто предположение о структуре электронных оболочек центров Mn в $YAl_3(BO_3)_4:Mn$ и вкладе ионов Mn различной валентности в спектры поглощения и люминесценции.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 21-72-00134.

Список литературы

1. Reddy G.V., et al. // *Ceramics International* 2014. V. 40 (2). P. 3399.
2. Bajaj N.S, Koparkar K.A., Nagpure P.A., et al. // *J. Opt.* 2017. V. 46. P. 91.
3. Jamalaiah B.C., Jayasimhadri M., Reddy G.V., et al. // *Phys. Chem. Glasses-B*. 2016. V. 57. P. 68.
4. Aleksandrovsky A.S., Gudim I.A., Krylov A.S., et al. // *Opt. Prop.* 2007. V. 49 (9). P. 695.

Е.В. КУЛЬПИНА, А.Н. БАБКИНА, К.С. ЗЫРЯНОВА

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ИОНОВ Mn^{4+} В ЩЕЛОЧНО-ГЕРМАНАТНЫХ СТЕКЛОКЕРАМИКАХ

Синтезирована серия германатных стеклокерамик, активированных ионами Mn^{4+} , содержащих различные наборы щелочных ионов. Исследовано влияние состава стеклокерамики на люминесцентные свойства иона-активатора. Установлено, что комбинация щелочных ионов Li-Na создаёт наилучшие условия для получения высоких значений квантового выхода и времени жизни люминесценции марганца.

E.V. KULPINA, A.N. BABKINA, K.S. ZYRYANOVA

ITMO University, Saint-Petersburg

INVESTIGATION OF THE SPECTRAL PROPERTIES OF Mn^{4+} IN ALKALI-GERMANATE GLASS-CERAMICS

A series of Mn^{4+} -doped germanate glass-ceramics, containing various combinations of alkaline ions, is synthesized. The effect of glass-ceramics composition on the luminescent properties of the activator ion is investigated. It is found that the combination of Li-Na alkaline ions provides the best conditions to obtain high values of quantum yield and lifetime of manganese luminescence.

В настоящее время разработка красных люминофоров для применения в светодиодных источниках белого света (w-LED) является одной из наиболее актуальных задач в технологиях освещения [1]. Наиболее популярными активаторами для неорганических красных люминофоров являются ионы Eu^{3+} , Sm^{3+} и Pr^{3+} , которым присущи электронные переходы, обуславливающие люминесценцию в красной области спектра [2]. Ввиду высокой стоимости редкоземельных элементов большой интерес для исследований представляют люминофоры, активированные ионами переходных металлов, в частности, четырёхвалентного марганца, максимум люминесценции которого располагается в области 650 - 700 нм.

В отличие от лантаноидов, при внедрении переходных металлов в неупорядоченные матрицы структура и состав локального окружения существенно влияют на спектральные свойства ионов-активаторов, из-за чего в аморфных материалах они, как правило, демонстрируют низкую эффективность люминесценции. Поэтому интересным направлением

исследований является внедрение ионов переходных металлов в стеклокерамики, которые занимают промежуточное положение между кристаллическими и стеклообразными материалами.

В качестве объектов исследования в данной работе были синтезированы щёлочно-германатные стёкла состава $0,25 \text{ MnO}_2 - 7,5 \text{ Li}_2\text{O} - 2,5 \text{ R}_2\text{O} - 89,75 \text{ GeO}_2$ (мол. %), где $\text{R} = \text{Na}, \text{K}, \text{Cs}, \text{Rb}$. Полученные образцы были подвергнуты термообработке в муфельной печи при температуре 560°C в течение пяти часов для получения стеклокерамики. В спектрах поглощения всех составов в видимой области присутствуют широкие полосы слабой интенсивности с максимумами в районе 335 и 460 нм, соответствующие ионам четырёхвалентного марганца. Более отчетливо эти полосы видны в спектрах возбуждения люминесценции (рис. 1). Максимум спектров люминесценции (рис. 2) лежит в области 665 - 670 нм, при этом наибольшим временем жизни (1,29 мс) и квантовым выходом люминесценции (37,3 %) обладает состав, содержащий литий и натрий.

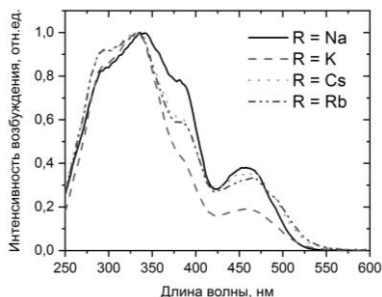


Рис. 1. Спектры возбуждения люминесценции образцов

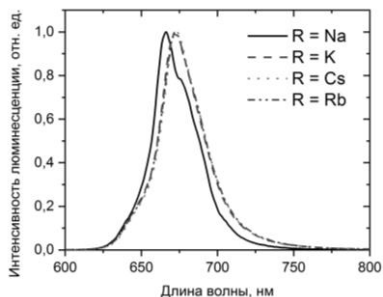


Рис. 2. Спектры люминесценции образцов

На основании проведенных исследований можно утверждать, что комбинация щелочных ионов Li-Na в составе германатной стеклокерамики обеспечивает наилучшие люминесцентные свойства ионов Mn^{4+} .

Синтез материалов выполнен при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых № МК-4235.2021.1.3. Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта НИРМА ФТ МФ Университета ИТМО.

Список литературы

1. Zhou Q., Dolgov L., Srivastava A., et al. // J. Mater. Chem. 2018. V. 6 (11). P. 2652.
2. Li Y., Zhang J., Zhang X., et al. // Chem. Mater. 2009. V. 21. P. 468.

Е.В. КУЛЬПИНА, А.Н. БАБКИНА, К.С. ЗЫРЯНОВА

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ МАРГАНЦА НА ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ЛИТИЙ-ЦИНК-ГЕРМАНАТНЫХ СТЕКЛОКЕРАМИК

В работе исследованы люминесцентные свойства литий-цинк-германатных стеклокерамик с различным содержанием марганца. Представлены спектры люминесценции и концентрационная зависимость времени жизни люминесценции. Определена оптимальная концентрация MnO_2 в составе шихты, при которой достигается наибольшее время жизни люминесценции в 1,39 мс.

E.V. KULPINA, A.N. BABKINA, K.S. ZYRYANOVA

ITMO University, Saint-Petersburg

MANGANESE CONCENTRATION EFFECT ON LUMINESCENT PROPERTIES OF LITHIUM-ZINC-GERMANATE GLASS-CERAMICS

In this work, the luminescent properties of lithium-zinc-germanate glass-ceramics with different manganese content are investigated. Luminescence spectra and concentration dependence of the luminescence lifetime are presented. The optimal concentration of MnO_2 in the glass composition, providing the longest luminescence lifetime of 1.39 ms, is determined.

Основным требованием к люминофорам, предназначенным для использования в белых светодиодных источниках (w-LED) на основе ультрафиолетового/синего светодиодного чипа, является узкополосная красная люминесценция [1]. При создании таких люминофоров чаще всего используются ионы Eu^{2+} и Mn^{4+} , однако последний обладает преимуществом с экономической точки зрения ввиду высокой стоимости редкоземельных элементов.

В качестве люминесцентного центра Mn^{4+} может быть успешно введён в системы трёх типов, а именно – оксиды, фториды и оксифториды. Наиболее интересны оксидные материалы, поскольку они обладают хорошей термической и химической стабильностью, что может обеспечить большое преимущество при создании высокостабильных белых светодиодов на основе оксидных люминофоров, активированных ионами Mn^{4+} [2].

В настоящей работе в качестве объектов исследования была синтезирована серия литий-цинк-германатных стеклокерамик путём объёмной термоиндуцированной кристаллизации исходных стёкол состава $(70-x) \text{ GeO}_2 - 15 \text{ Li}_2\text{O} - 15 \text{ ZnO} - x \text{ MnO}_2$, где $x = 0,01$ (#1); 0,025 (#2); 0,075 (#3); 0,1 (#4); 0,25 (#5) мол. %.

В спектрах люминесценции полученных стеклокерамик (рис. 1) присутствуют две полосы с максимумами в районе 670 и 535 нм, характерные для ионов Mn^{4+} и Mn^{2+} соответственно. При этом для составов с малым содержанием марганца интенсивности данных полос соизмеримы, тогда как в спектре составов с большими концентрациями преобладает полоса люминесценции четырёхвалентного марганца.

С помощью спектроскопии с временным разрешением было определено время жизни люминесценции Mn^{4+} для всех составов из серии (рис. 2). Наибольшее значение, составляющее 1,39 мс, достигается при содержании 0,05 мол. % MnO_2 в составе шихты. Снижение времени жизни при дальнейшем увеличении концентрации обусловлено концентрационным тушением люминесценции.

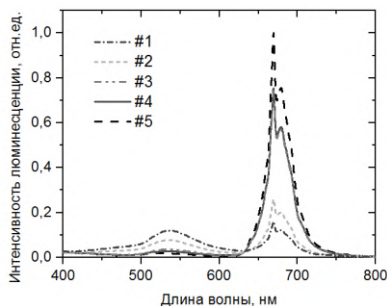


Рис. 1. Спектры люминесценции образцов

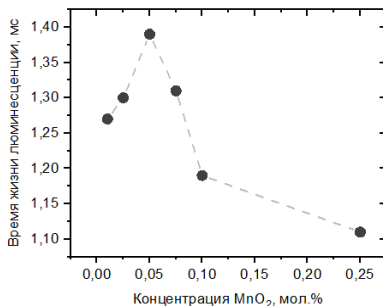


Рис. 2. Концентрационная зависимость времени жизни люминесценции Mn^{4+}

Проведённые исследования дают пищу для дальнейшей работы по оптимизации состава литий-цинк-германатных стеклокерамик, активированных марганцем, с целью улучшения их люминесцентных характеристик.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта НИРМА ФТ МФ Университета ИТМО.

Список литературы

1. Zhou Z., Zhou N., Xia M., et al. // J. Mater. Chem. 2016. V. 4 (39). P. 9143.
2. Adachi S. // J. Lumin. 2018. V. 202. P. 263.

А.И. БУХВОСТОВ, А.Н. БАБКИНА, Е.В. КУЛЬПИНА,
К.С. ЗЫРЯНОВА

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ
ОКСИДА БОРА НА СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА
ЩЁЛОЧНО-АЛЮМОБОРАТНЫХ СТЕКЛОКЕРАМИК
С ХРОМОМ**

Данная работа посвящена изучению влияния концентрации оксида бора на люминесцентные свойства ионов хрома в щёлочно-алюмоборатной стеклокерамике. Получены спектры оптической плотности и спектры люминесценции исследуемых материалов, представлены зависимости времени жизни и квантового выхода люминесценции ионов хрома от содержания оксида бора в составе стекла.

A.I. BUKHVOSTOV, A.N. BABKINA, E.V. KULPINA,
K.S. ZYRYANOVA

ITMO University, Saint-Petersburg

**INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF BORON OXIDE
CONCENTRATION ON THE SPECTRAL PROPERTIES
OF ALKALI-ALUMINA-BORATE GLASS CERAMICS
WITH CHROMIUM**

This work is devoted to the study of the influence of boron oxide concentration on the luminescent properties of trivalent chromium ions in alkali-alumina-borate glass ceramics. The optical density spectra and luminescence spectra of the studied materials with various concentrations of additives were obtained. The dependences of the lifetime and quantum yield of chromium ions luminescence on the content of boron oxides in the glass composition are also presented.

В эстетической медицине широкое распространение получили лазеры для красной и ближней ИК-области спектра, изготавливаемые на основе кристаллов (рубин, александрит и др.). Аналогом таким лазерам могли бы служить «рубиновые» лазеры, изготовленные на основе стёкол. Преимущество последних – более простой технологический процесс с низкими затратами на производство. Оптическим аналогом кристалла рубина могут служить наностеклокерамики, активированные ионами Cr^{3+} . Квантовый выход таких наностеклокерамик не уступает квантовому

выходу кристаллов, но процесс производства аналогичен стеклу. Характерной особенностью стеклокерамических материалов, активированных ионами Cr^{3+} , является интенсивная люминесценция в красной области спектра.

В качестве объектов исследования в данной работе была синтезирована серия стёкол щёлочно-алюмоборатной матрицы. Сверх 100 % все составы содержали 0.1 мол. % активатора Cr_2O_3 . Матрица стёкол имела состав: $(25 - 0,25x) \text{Li}_2\text{O} - (25 - 0,25x) \text{K}_2\text{O} - (50 - 0,5x) \text{Al}_2\text{O}_3 - x \text{B}_2\text{O}_3$, где $x = 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90$ мол. %. Стеклокерамики были синтезированы путём двухступенчатой термообработки исходных стёкол при температуре 450 °С в течение 10 часов и 600 °С в течение 1 часа.

Были получены: спектры оптической плотности, а также квантового выхода и времени жизни люминесценции Cr^{3+} при возбуждении длиной волны 532 нм (рис. 1).

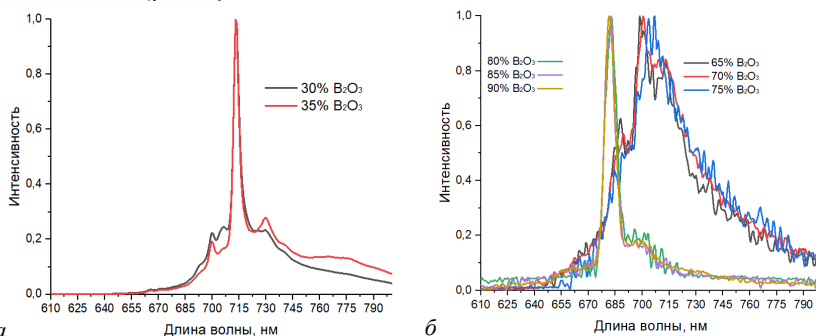


Рис. 1. Спектры оптической плотности (а), спектры квантового выхода и времени жизни люминесценции Cr^{3+} при возбуждении длиной волны 532 нм (б)

При увеличении концентрации бора максимум люминесценции смещается от 715 нм для 30 %-го и 35 %-го составов к 700 нм для составов с концентрацией 40 - 75 % и к 68 нм для составов с концентрацией 80, 85 и 90 %. При концентрациях бора 50, 55 и 60 % поглощение материала существенно ниже, чем для низких и высоких концентраций. В составах с концентрацией бора менее 75 % наблюдаются широкие полосы поглощения в областях 400 и 540 нм, соответствующие поглощению ионов Cr.

Синтез стёкол выполнен при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых № МК-4235.2021.1.3. Исследование оптических свойств выполнено при финансовой поддержке гранта НИРМА ФТ МФ Университета ИТМО.

Н.Н. КУЗЬМИН^{1,2,3}, К.Н. БОЛДЫРЕВ¹, В.В. МАЛЫЦЕВ³¹*Институт спектроскопии РАН, Троицк*²*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный*³*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

СПЕКТРЫ ПОГЛОЩЕНИЯ ТЕРБИЙ-ХРОМОВОГО БОРАТА СО СТРУКТУРОЙ ХАНТИТА

В работе приведены экспериментальные спектры поглощения двойного ортобората $\text{TbCr}_3(\text{BO}_3)_4$ в широких спектральном и температурном диапазонах. Определены соотношения политипных модификаций у этого соединения, энергии штарковских подуровней иона Tb^{3+} , обнаружены два магнитных фазовых перехода при 8.8 и 5 К.

N.N. KUZMIN^{1,2,3}, K.N. BOLDYREV¹, V.V. MALTSEV³¹*Institute for Spectroscopy of the RAS, Troitsk*²*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny*³*Lomonosov Moscow State University*

ABSORPTION SPECTRA OF TERBIUM CHROME BORATE WITH THE STRUCTURAL TYPE OF HUNTITE

The paper presents the experimental absorption spectra of double orthoborate $\text{TbCr}_3(\text{BO}_3)_4$ in wide spectral and temperature ranges. The ratios of the polytype modifications for this compound, the crystal-field levels of the Tb^{3+} ion have been determined, and two magnetic phase transitions have been found at 8.8 and 5 K.

В последние несколько десятилетий бораты вызывают большой интерес исследователей. Связано это с тем, что эти соединения, в отличие от других солей кислородсодержащих кислот, обладают большим разнообразием кристаллических структур [1]. С другой стороны, бораты зарекомендовали себя как перспективные функциональные материалы [2] и нашли широкое применение в оптических системах [3].

Среди них двойные ортобораты $\text{RM}_3(\text{BO}_3)_4$ ($R = \text{Y}, \text{La-Lu}, \text{Bi}, \text{In}$; $M = \text{Al}, \text{Sc}, \text{Fe}, \text{Ga}, \text{Cr}$) со структурным типом минерала хантита интенсивно изучаются около 60 лет. Эти соединения относятся к магнитоэлектрическим материалам, хотя изначально интерес к ним возник из-за нелинейных оптических и лазерных свойств. Наименее изученной частью этого семейства являются редкоземельные хромовые бораты.

Значительный интерес эти соединения вызывают из-за наличия двух магнитных подсистем, которые образованы ионами редкоземельных элементов и хрома. Именно они обуславливают интересные магнитные свойства, которые были обнаружены у редкоземельных железистых боратов этого семейства [4]. В литературе имеются немногочисленные результаты об исследовании условий синтеза редкоземельных хромовых боратов $RCr_3(BO_3)_4$, их структурных и магнитных свойств [5, 6]. На ранних этапах исследований полагалось, что структура этих соединений относится только к тригональной пространственной группе $R32$ [7], но в дальнейшем была обнаружена вторая структурная модификация с моноклинной пространственной группой $C2/c$ [8]. Обе модификации имеют схожие структуры и, как было обнаружено в последствие, часто кристаллизуются вместе. Этот факт усложняет интерпретацию экспериментальных данных. В связи с этим существует потребность в получение однофазных кристаллов этих соединений.

В настоящей работе получены спектры поглощения кристаллов тербий-хромового бората в дальней инфракрасной области. По этим спектрам обнаружена зависимость соотношения политипных модификаций с пространственными группами $R32$ и $C2/c$ от условий выращивания. Методом эрбиевого спектроскопического зонда определены температуры магнитных фазовых переходов в ромбоэдрическом поли типе $TbCr_3(BO_3)_4$, которые составили 8.8 и 5 К. Также в работе представлена схема шарковских уровней энергии иона Tb^{3+} в $TbCr_3(BO_3)_4$ в парамагнитном состоянии.

Работы по выращиванию кристаллов тербий-хромового бората выполнены за счёт средств Российского научного фонда (проект № 19-12-00235), спектроскопические исследования выполнялись при поддержке гранта РНФ № 19-12-00413.

Список литературы

1. Mutailipu M., Poeppelmeier K.R., Pan S. // Chemical Reviews. 2020. V. 121 (3). P. 1130.
2. Chen C., Wang Y., et. al. // Nature. 1995. V. 373. P. 322.
3. Mutailipu M., Zhang M., et. al. // Accounts Chem. Research. 2019. V. 52 (3). P. 791.
4. Кадомцева А.М., Попов Ю.Ф. и др. // Физика низких температур. 2010. Т. 36 (6). С. 640.
5. Bludov A., Savina Y., et. al. // J. Magnetism and Magnetic Materials. 2020. V. 512. P.167010.
6. Кузьмин Н.Н., Мальцев В.В. и др. // Неорганические материалы. 2020. Т. 56 (8). С.873.
7. Ballman A.A. // American Mineralogist. 1962. V. 47 (11-12). P. 1380.
8. Куражковская В.С., Боровикова Е.Ю. и др. // Журнал структурной химии. 2008. Т. 49 (6). С. 1074.

А.С. ПАВЛЮК, А.Н. БАБКИНА
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ СВОЙСТВ НАНОКРИСТАЛЛОВ ПЕРОВСКИТОВ CsPbBr_3 В БОРОГЕРМАНАТНОМ СТЕКЛЕ

Приведены результаты температурных измерений спектров поглощения образцов борогерманатного стекла с нанокристаллами CsPbBr_3 . При помощи температурной зависимости интенсивности поглощения на длине волны первого экситонного максимума нанокристаллов определены температуры предполагаемых фазовых переходов в диапазоне от 25 до 500 °С.

A.S. PAVLIUK, A.N. BABKINA
ITMO University, Saint-Petersburg

STUDY OF THE TEMPERATURE EFFECT ON SPECTRAL PROPERTIES OF PEROVSKITE NANOCRYSTALS CsPbBr_3 IN BOROGERMANATE GLASS

The results of temperature measurements of the absorption spectra of borogermanate glass samples with CsPbBr_3 nanocrystals are presented. Using the temperature dependence of the absorption intensity at the wavelength of the first exciton maximum of nanocrystals, the temperatures of the supposed phase transitions in the range from 25 to 500 °C are determined.

Перовскиты как материалы оптоэлектроники обладают многообещающими характеристиками [1]. Однако для их применения в условиях перепада температур необходимо предотвратить изменение спектральных свойств перовскитов вследствие претерпевания ими структурных изменений. Один из предполагаемых способов стабилизации структуры перовскитов – выделение нанокристаллов в стеклянной диэлектрической матрице. Для изучения фазовых переходов полупроводниковых нанокристаллов в аморфной диэлектрической возможно применить неразрушающий метод, основанный на регистрации спектров оптической плотности при разных температурах [2].

Цель работы – исследование спектральных свойств нанокристаллов CsPbBr_3 в борогерманатном стекле в диапазоне от комнатной температуры до температуры размягчения стекла. Объектом исследования являются стёкла, прошедшие термообработку при различных

температурах, в результате которой в стеклянной матрице были получены нанокристаллы CsPbBr_3 . Спектры, полученные при нагреве и охлаждении образца (рис. 1), позволяют построить зависимость интенсивности поглощения от температуры на длинах волн первого экситонного максимума нанокристаллов. По особенностям полученных кривых нагрева и охлаждения были определены температуры плавления ($450 - 515^\circ\text{C}$) и кристаллизации ($325 - 330^\circ\text{C}$), а также выявлены температурные области предполагаемых фазовых переходов нанокристаллов перовскитов CsPbBr_3 в борогерманатном стекле: $130 - 150^\circ\text{C}$ и $430 - 450^\circ\text{C}$. Первая область совпадает с температурами, при которых происходит один из фазовых переходов CsPbBr_3 [3], что свидетельствует о недостаточном влиянии стеклянной матрицы для стабилизации перовскита. Второй диапазон, вероятно, связан с областью стеклования и соответствующими структурными изменениями стекла. Анализ результатов свидетельствует о повышении температур фазовых превращений при росте температуры изотермической обработки стекла, что связано с увеличением размера нанокристаллов.

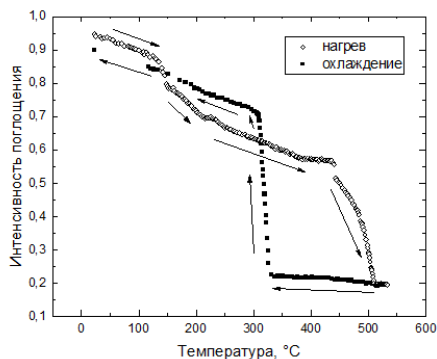


Рис. 1. Зависимость интенсивности поглощения первого экситонного максимума при нагреве и охлаждении образца с термообработкой 550°C

Синтез образцов выполнен при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых № МК-4235.2021.1.3. Температурные исследования выполнены при финансовой поддержке гранта НИРМА ФТ МФ Университета ИТМО.

Список литературы

1. Protesescu L., et al. // Nano Lett. 2015. V. 15. P. 3692.
2. Babkina A.N., et al. // Glass Phys. Chem. 2015. V. 41. P. 81.
3. Hirotsu S., et al. // J. Phys. Soc. Japan. 1974. V. 37. P. 1393.

И.А. ЧЕРНЕЦОВА, Е.П. КОЛЕСОВА, А.О. ОРЛОВА

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ЛЮМИНЕСЦЕНТНАЯ МИКРОСКОПИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СВОЙСТВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК CdSe/ZnS

В данной работе была проведена оценка изменения люминесцентных свойств коллоидного раствора и сухих слоёв квантовых точек (КТ) CdSe/ZnS двумя независимыми методиками: с помощью конфокальной люминесцентной микроскопии и по анализу кинетики затухания люминесценции КТ. В случае изменения концентрации люминофора в коллоидном растворе КТ наблюдается хорошая корреляция экспериментальных результатов двух измерений. Однако, для сухих образцов КТ наблюдается значительное отличие данных, полученных при анализе кинетики затухания люминесценции КТ. Основной причиной наблюдаемых отличий могут выступать как эффективное взаимодействие КТ в сухих слоях, так и импульсный режим возбуждающего лазерного излучения.

I.A. CHERNETSOVA, E.P. KOLESOVA, A.O. ORLOVA

ITMO University, Saint-Petersburg

LUMINESCENT MICROSCOPY FOR ESTIMATING THE LUMINESCENT PROPERTIES OF SEMICONDUCTOR QUANTUM DOTS CdSe/ZnS

In this work, assessed the change in the luminescence properties of the colloidal solution of quantum dots (QDs) and dry QD layers by two independent methods: using a confocal fluorescence microscopy and by the kinetics of luminescence decay of QDs. When assessing the change in the luminescent properties of the colloidal solution of QDs with a change in the phosphor concentration, a good correlation is observed between the experimental results of the two measurements. However, for dry QD samples, there is a discrepancy between the data of all measurements, from the analysis the decay kinetics of the QD luminescence. The main reason for the observed differences can be both the effective interaction of QDs in dry layers and the pulsed regime of exciting laser radiation.

Полупроводниковые квантовые точки являются традиционными неорганическими люминофорами с хорошо изученными оптическими свойствами. Зачастую функциональность структур на основе квантовых точек (КТ) оценивается по изменению их люминесцентных свойств КТ [1, 2]. Настоящая работа посвящена оценке изменения люминесцентных

свойств КТ методами люминесцентной микроскопии при контролируемом изменении люминесцентных свойств.

В качестве образцов использовались коллоидный раствор и сухие слои CdSe/ZnS КТ диаметром 5,5 нм. Сухие слои CdSe/ZnS КТ формировались с помощью модифицированной технологии Ленгмюра-Блоджетт [3]. Люминесцентные свойства образцов исследовались с помощью конфокального микроскопа LSM-710 и люминесцентного микроскопа с возможностью регистрации временно-разрешённых спектров MicroTime 100. Люминесцентные свойства образцов варьировались путём изменения концентрации люминофора в растворе и числа слоёв на подложке. Изменение люминесцентных свойств КТ оценивалось по анализу спектров люминесценции образцов, зарегистрированных с помощью конфокального микроскопа, и кривых затухания люминесценции, полученным с помощью микроскопа с временным разрешением. Анализ полученных данных показал, что в случае раствора КТ при изменении концентрации люминофора наблюдается хорошая корреляция экспериментальных результатов измерений. В случае сухих слоёв наблюдаются принципиальные отличия. По данным с конфокального микроскопа при увеличении числа слоёв в два раза наблюдается соответствующее изменение интегральной интенсивности люминесценции. Однако по данным кинетики затухания люминесценции измеряемая величина осталась без изменений ($< 10\%$). Такие отличия могут быть связаны с различными режимами работы источников возбуждающего излучения (на конфокальном микроскопе LSM-710 используется непрерывное лазерное излучение; на микроскопе MicroTime 100 – импульсный источник света с частотой следования импульсов 10 МГц), а также вследствие эффективного взаимодействия между КТ при переходе к сухим слоям. В продолжение работы будет разработана модель фотофизических процессов в КТ, позволяющая объяснить наблюдаемые изменения.

Список литературы

1. Yang C., et al. Efficient, stable, and photoluminescence intermittency-free CdSe-based quantum dots in the full-color range // ACS Photonics. 2021. V. 8. No. 8. P. 2538.
2. Blondot V., et al. Fluorescence properties of self-assembled colloidal supraparticles from CdSe/CdS/ZnS nanocrystals // New Journal of Physics. 2020. V. 22. No. 11. P. 113026.
3. Kolesova E.P., et al. Photoinduced charge transfer in hybrid structures based on titanium dioxide NPs with multicomponent QD exciton luminescence decay // The Journal of Physical Chemistry C. 2019. V. 123. No. 23. P. 14790-14796.

С.В. ГУЩИН, С.В. КУЗНЕЦОВ¹, А.А. ЛЯПИН,
В.Ю. ПРОЙДАКОВА¹, П.А. РЯБОЧКИНА, П.П. ФЕДОРОВ¹
*Национальный исследовательский Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарёва, Саранск*
¹*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

**ИССЛЕДОВАНИЕ АП-КОНВЕРСИОННОЙ
ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ПОРОШКОВ $\text{SrF}_2\text{:Er,Tm}$
ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ НА
УРОВЕНЬ $^4\text{I}_{13/2}$ ИОНОВ Er^{3+} И УРОВЕНЬ $^3\text{F}_4$ ИОНОВ Tm^{3+}**

Исследована ап-конверсионная люминесценция фторидных люминофоров $\text{SrF}_2\text{:Er,Tm}$ синтезированных методом соосаждения из водных растворов. При возбуждении лазерным излучением с длиной волны 1531.8 и 1645 нм люминофоры $\text{SrF}_2\text{:Er,Tm}$ обладают интенсивной ап-конверсионной люминесценцией в видимой и ближней инфракрасной области спектра. Исследована зависимость интенсивности ап-конверсионной люминесценции от концентрации редкоземельных ионов и определены значения энергетического выхода ап-конверсионной люминесценции для диапазонов 380 - 780 и 380 - 1100 нм. Рассчитаны значения координат цветностей и коррелированных цветовых температур ап-конверсионной люминесценции фторидных люминофоров.

S.V. GUSHCHIN, S.V. KUZNETSOV¹, A.A. LYAPIN,
V.Yu. PROYDAKOVA¹, P.A. RYABOCHKINA, P.P. FEDOROV¹
¹*National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk*
²*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*

**INVESTIGATION OF UPCONVERSION LUMINESCENCE
OF $\text{SrF}_2\text{:Er, Tm}$ POWDERS UPON EXCITATION LASER
RADIATION OF $^4\text{I}_{13/2}$ LEVEL OF Er^{3+} IONS AND $^3\text{F}_4$ LEVEL
OF Tm^{3+} IONS**

In this work, we investigated upconversion luminescence (UCL) fluoride phosphors. Fluorite-type $\text{SrF}_2\text{:Er,Tm}$ phosphors were synthesized by using a co-precipitation from an aqueous nitrate solution technique. $\text{SrF}_2\text{:Er,Tm}$ phosphors possess intense upconversion luminescence in the visible and near-infrared region of the spectrum upon excitation laser radiation with wavelength 1531.8 and 1645 nm. We have studied the intensity UCL dependent on rare-earth concentration. Also, we estimated upconversion luminescence energy yield in the 380 - 780 and 380 - 1100 nm spectral ranges. Values of chromaticity coordinates and correlated color temperatures of upconversion luminescence of fluoride phosphors were calculated.

К настоящему времени ап-конверсионные люминофоры, легированные редкоземельными ионами, активно изучаются множеством научных групп, для применения в биофотонике, лазерной физике, солнечной энергетике, анти-контрафактной защите, оптогенетике, криминалистике и т.д. [1 - 7].

В настоящей работе объектами исследования являлась концентрационная серия фторидных люминофоров со структурой флюорита $\text{SrF}_2:\text{Er},\text{Tm}$ синтезированная методом соосаждения из водных растворов. На рис. 1а представлен спектр отражения ионов Er^{3+} и Tm^{3+} в диапазоне 300 - 1800 нм, полученные для люминофора $\text{SrF}_2:\text{Er}(0.5\%),\text{Tm}(2.5\%)$. При возбуждении лазерным излучением с длиной волны 1531.8 нм и 1645 нм люминофоры $\text{SrF}_2:\text{Er},\text{Tm}$ обладают интенсивной ап-конверсионной люминесценцией (рис. 1б и 1в).

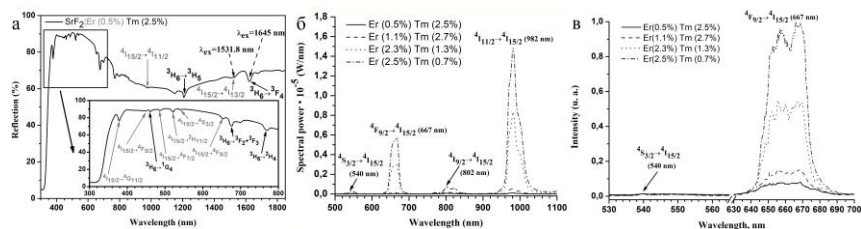


Рис. 1. Спектр отражения ионов Er^{3+} и Tm^{3+} (а); спектры ап-конверсионной люминесценции люминофоров $\text{SrF}_2:\text{Er},\text{Tm}$ при возбуждении лазерным излучением с длиной волны: 1531.8 нм (б) и 1645 нм (в)

Исследование показало, что люминофоры $\text{SrF}_2:\text{Er},\text{Tm}$ способны преобразовывать инфракрасное излучение в спектральной области 1.5 - 1.6 мкм в люминесценцию видимого спектрального диапазона.

Список литературы

1. Liu X., Chen H., et al. // Nat. Commun. 2021. V. 12 (1). P. 5662.
2. Ghazy A., Safdar M., et al. // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 2021. V. 230. P. 111234.
3. Suo H., Zhu Q., et al. // Mater. Today Phys. 2021. V. 21. P. 100520.
4. Lin Y., Yao Y., et al. // Acta Biomater. 2021. V. 135. P. 1.
5. Wang M., Li M., et al. // Nano Res. 2015. V. 8 (6). P. 1800.
6. Auzel F. // Chem. Rev. 2004. V. 104 (1). P. 139.
7. Lyapin A.A., Gushchin S.V., et al. // Opt. Mater. Express. 2018. V. 8 (7). P. 1863.

П.В. КАРПАЧ, Г.Т. ВАСИЛЮК, А.О. АЙТ¹,
В.А. БАРАЧЕВСКИЙ¹, С.А. МАСКЕВИЧ²

Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Беларусь

¹*Центр фотохимии ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва*

²*Международный государственный экологический институт им. А.Д. Сахарова
БГУ, Минск, Беларусь*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФОТОУПРАВЛЯЕМЫХ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ НАНОЧАСТИЦ

В результате моделирования процесса индуктивно-резонансного переноса энергии (FRET) в полимерных наносферах, содержащих люминесцентные квантовые точки и фотоизомеризующиеся молекулы диарилэтена, получены оптимальные значения параметров, влияющих на эффективность модуляции флуоресценции за счёт FRET.

P.V. KARPACH, G.T. VASILYUK, A.O. AYT¹,
V.A. BARACHEVSKY¹, S.A. MASKEVICH²

Yanka Kupala Grodno State University, Belarus

¹*Photochemistry Center of FSRC "Crystallography and Photonics" of the RAS, Moscow*

²*International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, Minsk*

MODELING OF THE PARAMETERS OF PHOTO-CONTROLLED LUMINESCENT NANOPARTICLES

As a result of modeling the process of Förster resonance energy transfer (FRET) in polymer nanospheres containing luminescent quantum dots and photoisomerizing diarylethene molecules, the optimal values of the parameters influencing the efficiency of fluorescence modulation due to FRET were obtained.

В фотоуправляемых люминесцентных устройствах перспективно использование систем, содержащих флуорофор – например, полупроводниковую квантовую точку (КТ) – и переключатель сигнала флуоресценции на основе фотоизомеризуемой фотохромной молекулы [1]. Модуляция интенсивности флуоресценции в таких системах может осуществляться либо вследствие индуктивно-резонансного переноса энергии (FRET) с флуорофора на фотохром либо путём перепоглощения света флуоресценции фотохромным соединением.

В настоящей работе проведён анализ параметров, влияющих на эффективность модуляции флуоресценции за счёт FRET для фотохромных

систем с обратимой модуляцией флуоресценции на основе полимерных наносфер, содержащих полупроводниковые КТ CdSe/ZnS и молекулы фотохромного диарилэтена ДАЭ1 (рис. 1). Синтез и экспериментальное исследование спектрально-кинетических характеристик этих наносфер описаны в [2]. Результаты работы [2] выявили необходимость моделирования процесса FRET в таких наносферах для оптимизации технологии синтеза с целью улучшения структуры и свойств наносфер.

На основе известных соотношений теории Фёрстера построена модель эффективности модуляции флуоресценции КТ $E(r)$ находящимися вблизи фотохромными молекулами диарилэтена ДАЭ1, за счёт механизма FRET. Эффективность $E(r)$ тушения флуоресценции КТ за счёт переноса энергии на циклические фотоизомеры ДАЭ1 (при фиксированном значении радиуса Фёрстера R_0) будет зависеть от расстояния r между донорами (КТ) и акцепторами (ДАЭ1) энергии, а также от количества акцепторов в окружении одного донора. Из рис. 2 видно, что высокие значения эффективности FRET ($E(r) \sim 0,8$) можно достичь для любого из используемых значений квантового выхода флуоресценции КТ от 0,04 до 0,4 при ранее оценённом среднем количестве молекул ДАЭ1 на одну КТ в наносфере $n \sim 6$.

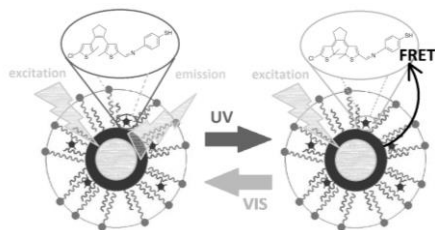


Рис. 1. Схема фотоиндуцированной модуляции флуоресценции в нанокompозитных полимерных наносферах, содержащих КТ и ДАЭ1 [2]

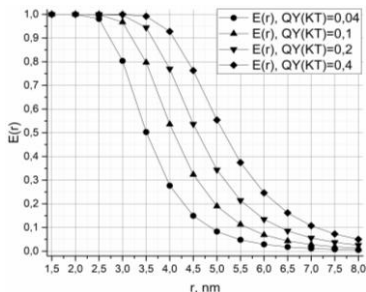


Рис. 2. Зависимость эффективности FRET от расстояния между КТ и ДАЭ1 и от квантового выхода флуоресценции (при количестве молекул ДАЭ1 на КТ $n = 6$)

Список литературы

1. Klajn R., Stoddart J.F., Grzybowski B.A. // Chem. Soc. Rev. 2010. V. 39. P. 2203.
2. Scherbovich A.A., et. al. // The Journal of Physical Chemistry C. 2020. V. 124. P. 27064.

А.С. САРАТОВСКИЙ^{1,2}, С.К. ЕВСТРОПЬЕВ^{1,3,4},
В.М. ВОЛЫНКИН³, К.В. ДУКЕЛЬСКИЙ^{3,4,5}

¹*Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)*

²*Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН, Санкт-Петербург*

³*Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург*

⁴*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

⁵*Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича*

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СПЕКТРАЛЬНЫХ СВОЙСТВ РАСТВОРОВ И КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ Ag/AgBr/Zn(NO₃)₂/ПВП

Приведены результаты экспериментов по синтезу и исследованию структуры и люминесцентных свойств композиционных покрытий Ag/AgBr/Zn(NO₃)₂/ПВП. Показано, что люминесцентные свойства определяются присутствием в структуре материалов различных небольших молекулярных кластеров Ag_n (n < 5). Формирование частиц AgBr сопровождается изменением формы спектров люминесценции, что свидетельствует об эволюции размеров и концентрации различных молекулярных кластеров Ag_n при введении бромид-анионов в состав материалов.

A.S. SARATOVSKIY^{1,2}, S.K. EVSTROPIEV^{1,3,4}, V.M. VOLYNKIN³,
K.V. DUKELSKY^{3,4,5}

¹*Saint-Petersburg State Technological Institute (Technical University)*

²*Grebenshchikov Institute of Silicate Chemistry of the RAS, Saint-Petersburg*

³*S.I. Vavilov State Optical Institute, Saint-Petersburg*

⁴*ITMO University, Saint-Petersburg*

⁵*Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications*

INVESTIGATION OF THE STRUCTURE AND SPECTRAL PROPERTIES OF SOLUTIONS AND COMPOSITE COATINGS Ag/AgBr/Zn(NO₃)₂/PVP

Are presented the results of experiments on the synthesis and investigation of the structure and luminescent properties of composite coatings Ag/AgBr/Zn(NO₃)₂/PVP. It is shown that the luminescent properties are determined by the presence of various small molecular Ag_n clusters (n < 5) in the structure of materials. The formation of AgBr particles is accompanied by a change in the shape of the luminescence spectra, which indicates the evolution of the sizes and concentrations of various molecular Ag_n clusters when bromide anions are introduced into the composition of materials.

Композиционные органо-неорганические покрытия, содержащие поливинилпирролидон (ПВП) и соли металлов используются в качестве иммерсионных [1], люминесцентных [2] и нелинейно-оптических покрытий [3]. Введение в их состав наночастиц серебра позволяет использовать эти покрытия в качестве прозрачных электродов [4].

В качестве исходных материалов в настоящей работе были использованы водные растворы $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$, AgNO_3 , KBr и ПВП ($M_w = 1300000$; Sigma Aldrich). На первом этапе синтеза растворы $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$, AgNO_3 и ПВП смешивались при комнатной температуре до образования однородной жидкой смеси. Затем к полученному раствору при перемешивании медленно добавлялся раствор KBr .

В работе приведены результаты исследования спектральных свойств композиционных $\text{Ag}/\text{AgBr}/\text{Zn}(\text{NO}_3)_2/\text{ПВП}$ покрытий нанесённых на стеклянные подложки. Измерение спектров светоослабления растворов и покрытий осуществлялось на спектрофотометре Perkin Elmer ННН. Исследование спектров люминесценции проводилось на приборе Perkin Elmer LS-50В. Структура полученных покрытий изучалась рентгенофазовым анализом, на приборе Rigaku Ultima IV.

Люминесцентные свойства водных растворов и сформированных из них композиционных покрытий $\text{Ag}/\text{AgBr}/\text{Zn}(\text{NO}_3)_2/\text{ПВП}$ в значительной мере определяются присутствием в структуре материалов различных небольших молекулярных кластеров Ag_n ($n < 5$). Наиболее интенсивная люминесценция наблюдается в синей части спектра ($\lambda_{\text{em}} = 400 \div 420$ нм) при возбуждении УФ-излучением. Формирование частиц AgBr сопровождается изменением формы спектров люминесценции, что свидетельствует об эволюции размеров и концентрации различных молекулярных кластеров Ag_n при введении бромид-анионов в состав материалов.

Список литературы

1. Evstropiev S.K., Dukelskii K.V., et. al. // *Polymers for Advanced Technologies*. 2016. V. 27. P. 1258-1260.
2. Evstropiev S.K., Nikonorov N.V., et. al. // *Photochemistry and Photobiology A: Photochemistry*. 2020. V. 403. P. 112858.
3. Kulagina A.S., Evstropiev S.K., et. al. // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. V. 1124, No. 5. P. 051060.
4. Rui Y., Zhao W., et. al. // *Nanomaterials*. 2018. V. 8. P. 161.

М.Г. ГУЩИН, Т.А. ВАРТАНЯН, В.О. ОКУНЕВ¹

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

¹*ООО «Микросенсор», Санкт-Петербург*

ВЛИЯНИЕ НЕСОВЕРШЕНСТВА РАЗДЕЛИТЕЛЬНОГО СЛОЯ ДИЭЛЕКТРИКА НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ГАЗОВОГО СЕНСОРА НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР С ЭФФЕКТОМ ПЛАЗМОН-ИНДУЦИРОВАННОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ

Было проведено теоретическое исследование отражения света через многослойную структуру с эффектом плазмон-индуцированной прозрачности. Структура состоит из слоя плазмонного металла, слоя диэлектрика с низким показателем преломления и диэлектрика с высоким показателем преломления. Обнаружено, что несовершенство слоя диэлектриков в таких структурах значительно влияет на интенсивность полосы восстановленного полного внутреннего отражения.

M.G. GUSHCHIN, T.A. VARTANYAN, V.O. OKUNEV¹

ITMO University, Saint-Petersburg

¹*Microsensor LLC, Saint-Petersburg*

INFLUENCE OF DIELECTRIC SPACER LAYER IMPERFECTIONS ON THE SENSITIVITY OF A GAS SENSOR BASED ON MULTILAYER STRUCTURES WITH PLASMON-INDUCED TRANSPARENCY EFFECT

A theoretical study of light reflection from a multilayer structure with a plasmon-induced transparency effect was performed. The structure consists of a plasmonic metal layer, a dielectric layer with a low refractive index, and a dielectric with a high refractive index. It was found that the imperfection of the dielectric layers in such structures significantly affects the intensity of the restored total internal reflection band.

На границе плёнки плазмонного металла и аналита может происходить возбуждение поверхностного плазмон-поляритона. В результате у такой структуры существует узкий диапазон углов, в котором нарушается полное внутреннее отражение, то есть появляется провал в зависимости коэффициента отражения от угла. При нанесении поверх металлической плёнки двух дополнительных слоёв различных диэлектрических материалов можно достигнуть восстановления полного внутреннего

отражения в ещё более узком диапазоне углов. Такое явление называется плазмон индуцированная прозрачность. Оно обусловлено связью между двумя резонансными системами: поверхностным плазмон-поляритоном на границе металлической поверхности и основной модой несимметричного плоского волновода. Волновод образуется в многослойной структуре, состоящей из диэлектрика с низким показателем преломления, диэлектрика с большим показателем преломления и аналита. Связь между поверхностным плазмон-поляритоном и волноводной модой определяется толщиной диэлектрического слоя с низким показателем преломления, отделяющего металлическую плёнку от слоя диэлектрика с высоким показателем преломления. При относительно слабой связи между резонансами область углов, в которой восстанавливается полное внутреннее отражение, может быть сделана очень узкой. Поэтому явление плазмон-индуцированной прозрачности перспективно для создания на его основе высокоточных химических и биологических сенсоров.

В ходе теоретических расчётов многослойных моделей с эффектом плазмон-индуцированной прозрачности было обнаружено, что при использовании диэлектриков с неидеальной структурой плёнки, которая моделировалось введением эффективного поглощения в слое, в спектрах отражения начинает значительно уменьшаться интенсивность полосы восстановленного полного внутреннего отражения. Такое явление негативно влияет на чувствительность к различным анализитам.

Увеличение коэффициента поглощения фторида магния связано с рассеянием света на неоднородностях плёнки, обусловленных несовершенством её структуры. Можно сделать выводы, что для реализации преимуществ многослойных структур с эффектом плазмон-индуцированной прозрачности необходимо не только использовать монохроматический источник с малой угловой расходимостью, но и обеспечить достаточно высокое качество плёнок диэлектриков, чтобы это не внесло существенные потери в чувствительность таких структур.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта НИРМА ФТ МФ Университета ИТМО.

С.А. АСТАШКЕВИЧ¹, А.А. КУДРЯВЦЕВ^{1,2}¹Санкт-Петербургский государственный университет²Харбинский технологический институт, Китай

САМОСОГЛАСОВАННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ Cs-Ar РЕЗОНАНСНОЙ ФОТОПЛАЗМЫ С УЧЁТОМ СТОЛКНОВИТЕЛЬНОГО УШИРЕНИЯ D1 И D2 ЛИНИЙ Cs

Параметры стационарной фотоплазмы газовой смеси Cs и Ar в цилиндрической ячейке радиусом $R = 0.5$ см и длиной $L = 1$ см определены для различных скоростей возбуждения резонансных уровней Cs и давлений $P_{\text{Cs}} = 0.02$ торр и $P_{\text{Ar}} = 1$ торр в рамках самосогласованной модели, учитывающей поглощение и перенос (приближение Бибермана-Холстейна) резонансного излучения, плазмохимические реакции и процессы переноса зарядов. Учтено влияние уширение резонансных D1 и D2 линий Cs столкновениями Cs–Cs, Ar–Cs и e–Cs на перенос излучения.

S.A. ASTASHKEVICH¹, A.A. KUDRYAVTSEV^{1,2}¹Saint-Petersburg State University²Harbin Institute of Technology, China

SELF-CONSISTENT DETERMINATION OF Cs-Ar RESONANCE PHOTOPLASMA PARAMETERS TAKING INTO ACCOUNT THE COLLISIONAL BROADENING OF THE D1 AND D2 LINES OF Cs

Parameters of the steady photoplasma in a gas mixture of Cs and Ar in a cylindrical cell with the radius $R = 0.5$ cm and length $L = 1$ cm are determined for pressures $P_{\text{Cs}} = 0.02$ torr and $P_{\text{Ar}} = 1$ torr within the framework of a self-consistent model taking into account the absorption and transfer (in the Biberman-Holstein approximation) of resonance radiation, plasma chemical reactions and charge transfer processes. The effect of broadening of the resonance D1 and D2 lines of Cs by the Cs–Cs, Ar–Cs and e–Cs collisions on the radiation transfer is taken into account.

Проведено моделирование стационарной фотоплазмы в Cs–Ar газовой смеси, создаваемой резонансным излучением концентрированного солнечного/лампового излучения. Модель включает 6^2S , 6^2P , 5^2D и 6^2D состояния Cs, а также ионы Cs^+ и Cs_2^+ . Учитывались: поглощение резонансного излучения атомами Cs, пеннинговская и ассоциативная ионизация передача возбуждения атомами Cs, неупругие e–Cs удары первого и второго рода, ступенчатая ионизация, диссоциативная и столкновительно-излучательная рекомбинации, перенос заряда и перенос излучения в приближении Бибермана-Холстейна. Процедура

самосогласованного определения параметров плазмы аналогична описанной ранее в [1]. В рамках этой процедуры проведён учёт влияния уширения D1 и D2 линий атомов цезия столкновениями Cs–Cs, Ar–Cs и e–Cs на перенос резонансного излучения, используя имеющиеся в литературе данные о константах уширения. Эффективные вероятности резонансного излучения рассчитаны, используя формулы для контура Фойгта из [2].

Были определены концентрации всех компонентов плазмы, включая концентрацию резонансных уровней Cs, атомарных и молекулярных ионов Cs и электронов (рис. 1а), и электронная температура (рис. 1б) для цилиндрической геометрии газовой ячейки радиусом $R = 0.5$ см и длиной $L = 1$, содержащей 0.02 торр паров Cs и 1 торр Ar при температуре газа $T_g = 438$ К и пространственно однородной скорости резонансного возбуждения $K_{\text{рез}} = 3 \times 10^{22} - 10^{25} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ уровней $6^2P_{1/2}$ и $6^2P_{3/2}$ атомов Cs. Обнаружено, что ионный состав плазмы состоит в основном из молекулярных ионов Cs_2^+ при $K_{\text{рез}} < 7 \times 10^{23} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ и атомарных ионов Cs^+ при больших значениях $K_{\text{рез}}$ (рис. 1а). Полученные результаты могут быть полезны при разработке фотоэлектрического преобразователя с использованием газовых смесей [3], содержащих пары цезия.

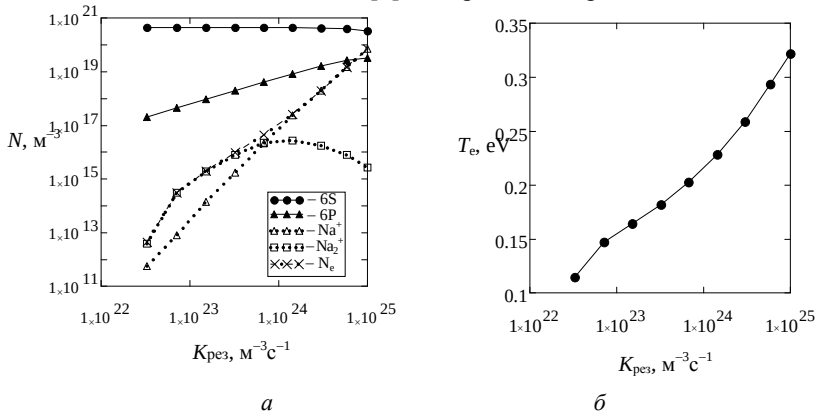


Рис. 1. Рассчитанные зависимости концентрации N уровней 6S и 6P атомов Cs, ионов Cs^+ , Cs_2^+ и электронов (а) и температуры электронов T_e (б) от скорости возбуждения резонансных уровней цезия $K_{\text{рез}}$ в исследуемой газовой ячейке

Список литературы

1. Astashkevich S.A., Kudryavtsev A.A. // Phys. Plasmas. 2019. V. 26. No. 10. P. 103509.
2. Kastner S.O. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 1995. V. 54. No. 6. P. 1001.
3. Mandour M.M., Astashkevich S.A., Kudryavtsev A.A. // Plasma Sources Sci. Technol. 2020. V. 29. No. 11. P. 115005.

А.Н. ХОПЁРСКИЙ, А.М. НАДОЛИНСКИЙ, Р.В. КОНЕЕВ

Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону

ЭФФЕКТ АНИЗОТРОПИИ НЕУПРУГОГО РАСЩЕПЛЕНИЯ ФОТОНА АТОМНЫМ ИОНОМ

Теоретически предсказан эффект анизотропии неупругого расщепления рентгеновского фотона на два фотона атомным ионом.

A.N. HOPERSKY, A.M. NADOLINSKY, R.V. KONEEV

Rostov State Transport University, Rostov-on-Don

THE EFFECT OF ANISOTROPY OF INELASTIC SPLITTING OF A PHOTON BY AN ATOMIC ION

The effect of anisotropy of inelastic splitting of a photon into two photons by atomic ion is theoretically predicted.

На примере гелиоподобного атома неона (Ne^{8+} , заряд ядра иона $Z = 10$, конфигурация и терм основного состояния $[0] = 1s^2 [^1S_0]$) исследован процесс неупругого расщепления $\hbar\omega$ -фотона на два $\hbar\omega_1$ - и $\hbar\omega_2$ -фотона:

$$\hbar\omega + [0] \rightarrow \left\{ \begin{matrix} K_1 \\ K_2 \end{matrix} \right\} \rightarrow 1s\epsilon p(^1P_1) + \hbar\omega_1 + \hbar\omega_2,$$

$$K_1 = 1sxp(^1P_1),$$

$$K_2 = 1sxs(^1S_0) + \hbar\omega_n, \quad n = 1, 2,$$

где $x(\epsilon)$ – энергия электрона сплошного спектра промежуточного (конечного) состояния рассеяния.

Учёт лишь канала K_1 рассеяния (локальное двойное тормозное излучение) в дипольном приближении для $\hat{R}(\hat{C})$ – оператора радиационного (контактного) перехода выполнен в [1]. Здесь мы даём обобщение результатов [1] на случай дополнительного учёта канала K_2 рассеяния (собственно двойное комптоновское рассеяние) вне рамок дипольного приближения для $\hat{C}$ – оператора. Результаты расчёта результирующих индикатрис рассеяния представлены на рис. 1. Как в

длинноволновой области энергий $\hbar\omega_n$ -фотонов ($\hbar\omega_n = 1.5$ keV, $\lambda_n = 8.27$ Å), так и в коротковолновой области энергий $\hbar\omega_n$ -фотонов ($\hbar\omega_n = 2.5$ keV, $\lambda_n = 4.96$ Å) вклад канала K_2 рассеяния исчезающе мал и практически сохраняется симметрия результирующей индикатрисы рассеяния во взаимно перпендикулярных направлениях расщепления $\theta = 0^\circ, 180^\circ$ и $\theta = \pm 90^\circ$.

Результаты проведённого исследования могут оказаться важными, в частности, в физике плазмы [2] и при интерпретации спектров рентгеновской эмиссии гелиоподобных ионов от горячих астрофизических объектов [3, 4].

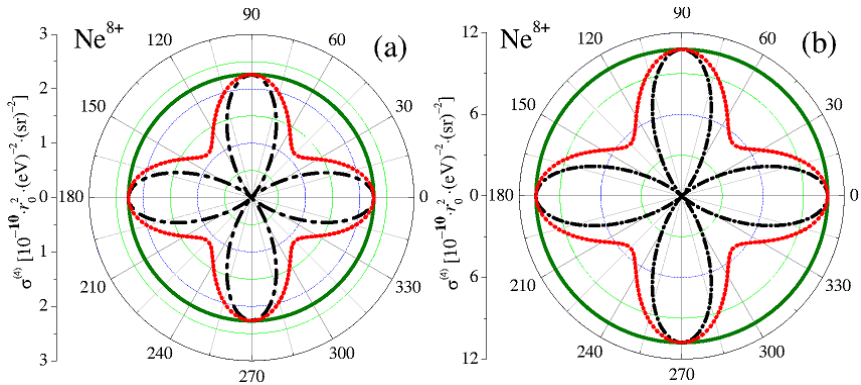


Рис. 1. Индикатрисы рассеяния с полярным радиусом $\rho = \sigma^{(4)}$ (четырёхдифференциальное сечение расщепления) и полярным углом θ при фиксированных значениях энергий падающего ($\hbar\omega = 6.4$ keV) и рассеянных [$\hbar\omega_n = 1.5$ keV (a), $\hbar\omega_n = 2.5$ keV (b)] фотонов; схема предполагаемого эксперимента: $\perp$ [сплошная кривая – векторы поляризации фотонов ($\vec{e}_\omega, \vec{e}_n$) перпендикулярны плоскости рассеяния ($\mathcal{P}$); $\parallel$ (штрих-пунктирная – $\vec{e}_\omega, \vec{e}_n \parallel \mathcal{P}$); неполяризованные фотоны (пунктирная); спектральное разрешение предполагаемого эксперимента не учитывалось. r_0 – классический радиус электрона

Список литературы

1. Hopersky A.N., et al. // J. Phys. B. 2021. V. 54. P. 155601.
2. Beiersdorfer P. // J. Phys. B. 2015. V. 48. P. 144017.
3. Martinez–Chicharro M., et al. // MNRAS. 2021. V. 501. P. 5646.
4. Pradhan P., et al. // Astrophys. J. 2021. V. 915. P. 114.

М.М. МАНДУР³, С.А. АСТАШКЕВИЧ¹, А.А. КУДРЯВЦЕВ^{1,2}

¹Санкт-Петербургский государственный университет

²Харбинский технологический институт, Китай

³Университет Загазиг, Египет

ИЗМЕНЕНИЕ ЗНАКА ФОТОЭДС ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ВСЛЕДСТВИЕ КОНКУРЕНЦИИ АМБИПОЛЯРНОЙ И СВОБОДНОЙ ДИФФУЗИИ ЗАРЯДОВ

Проведена 2D-симуляция зависимости ЭДС стационарной резонансной фотоплазменной двухкамерной ячейки в смеси Na–Ar от давления $P_{Ar} = 0.1 - 100$ торр при давлении $P_{Na} = 0.02$ торр. Учтено влияние столкновительного уширения D1 и D2 линий Na на перенос излучения. Обнаружено изменение знака фотоЭДС при $P_{Ar} = 5 - 10$ торр, обусловленное переходом от режима амбиполярной диффузии к режиму свободной диффузии при увеличении давления Ar в газовой ячейке.

M.M. MANDOUR³, S.A. ASTASHKEVICH¹, A.A. KUDRYAVTSEV^{1,2}

¹Saint-Petersburg State University

²Harbin Institute of Technology, China

³Zagazig University, Egypt

CHANGE IN THE SIGN OF THE PHOTO-EMF OF PHOTOELECTRIC CONVERTER DUE TO COMPETITION BETWEEN AMBIPOLEAR AND FREE DIFFUSION OF CHARGES

A 2D-simulation of the dependence of the EMF of a steady resonance photoplasma two-chamber cell containing a Na–Ar mixture at the $P_{Ar} = 0.1 - 100$ and $P_{Na} = 0.02$ torr pressures was carried out. The effect of collisional broadening of the D1 and D2 lines of Na on the radiation transfer is taken into account. The change in the sign of the photo-EMF at the $P_{Ar} = 5 - 10$ torr was found caused by the transition from the ambipolar diffusion mode to the free diffusion one with increasing of the Ar pressure in the gas cell.

Используя COMSOL Multiphysics Plasma Module, проведена 2D-симуляция стационарной резонансной фотоплазмы цилиндрической двухкамерной ячейки [1, 2] со смесью Na и Ar в диапазоне давлений $P_{Ar} = 0.1 - 100$ torr при давлении $P_{Na} = 0.02$ torr и температуре газовой смеси $T_g = 580$ К. Радиус и длина первой и второй камер: ($R_1 = 0.5$ см; $L_1 = 1$ см) и ($R_1 = L_1 = 2$ см), соответственно. Предполагалось, что в первой камере происходит поглощение резонансного излучения (D1 и D2 линии Na) при пространственно однородной скорости резонансного возбуждения

$K_{\text{рез}}$. Вторая камера играла роль балластной камеры и электрически изолирована от первой камеры.

Перенос излучения в первой камере проводился в приближении Бибермана-Холстейна для фойгтовского контура D1 и D2 линий Na, используя формулы из [3], учитывая, в отличие от наших предыдущих работ, уширение этих линий столкновениями Na–Na и Ar–Na, используя данные о константах столкновительного уширения этих линий. Рассчитанные зависимости эффективных значений вероятности радиационных переходов в первой камере для D1 и D2 линий Na от давления Ar приведены на рис. 1. Видно, существенное увеличение этих вероятностей с ростом P_{Ar} вследствие увеличения лоренцевской составляющей контура этих линий и, соответственно, увеличения доли переноса излучения в крыльях этих линий. На рис. 2 представлена зависимость фотоЭДС (разности потенциалов между стенками двух камер) от давления Ar. Абсолютное значения фотоЭДС достигает 1 В при $P_{\text{Ar}} = 0.1$ и 100 торр. В области $P_{\text{Ar}} = 5 - 10$ торр фотоЭДС изменяет знак (рис. 2), что можно объяснить переходом от режима амбиполярной диффузии к режиму свободной диффузии, связанным с уменьшением концентрации зарядов и уменьшением области плазмы в центре первой камеры при увеличении P_{Ar} и увеличением толщины пристеночного слоя ионов в этой камере, где условие квазинейтральности нарушается.

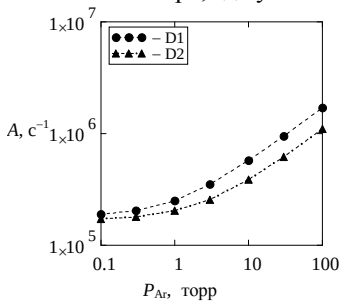


Рис. 1. Зависимости от давления P_{Ar} эффективных вероятностей радиационных переходов для D1 и D2 линий Na в исследованной газовой ячейке

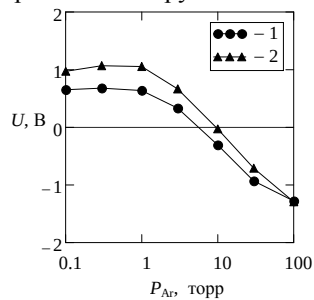


Рис. 2. Зависимость фотоЭДС газовой ячейки U от давления P_{Ar} для значений скорости резонансного возбуждения $K_{\text{рез}} = 6 \times 10^{22} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ (1) и $1 \times 10^{23} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ (2)

Список литературы

1. Mandour M.M., Astashkevich S.A., Kudryavtsev A.A. // Plasma Sources Sci. Technol. 2020. V. 29 (11). No. 11. P. 115005.
2. Mandour M.M., Astashkevich S.A., Kudryavtsev A.A. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2021. V. 49. P. 990.
3. Kastner S.O. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 1995. V. 54 (6). P. 1001.

А.Е. КРУПСКАЯ, В.В. ФИЛАТОВ

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА ИНТЕРФЕРЕНЦИИ СОСТОЯНИЙ НА ГЕНЕРАЦИЮ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В ПРОСТЕЙШЕЙ БИНАРНОЙ КВАНТОВОЙ СИСТЕМЕ

Проанализировано влияние интерференции базисных состояний простейшей бинарной системы «протон + электрон» (атом водорода) на генерацию гравитационных волн. Предсказывается присутствие в гравитационно-волновом спектре системы высокочастотных биений, имеющих квантовую природу.

A.E. KRUPSKAYA, V.V. FILATOV

Bauman Moscow State Technical University

QUANTUM-INDUCED BEATS IN THE GRAVITATIONAL SPECTRUM OF AN ATOM

The paper demonstrates the interference of quantum states of an atom results to the quantum-induced high-frequency beats in the gravitational wave spectrum.

Задача последовательного согласования квантовой физики и общей теории относительности как теории гравитации является исключительно трудной и до сих пор не доведена до конца. В настоящей работе показано, что поведение простейшего микрогенератора гравитационных волн – бинарной системы «протон + электрон» (атом водорода) качественно отличается от известных макроскопических генераторов.

В работе [1] было получено классическое выражение, описывающее потерю энергии бинарной системы, состоящей из компонентов с массами m_1 и m_2 , на излучение гравитационных волн:

$$N = |dW/dt| = (G/45c^5) \times (d^3 D_{\alpha\beta}/dt^3)^2 = (32GM^2\omega^6 r^4)/(5c^5). \quad (1)$$

В представленном выражении $D_{\alpha\beta}$ – тензор квадрупольного момента массы бинарной системы, $M = m_1 m_2 / (m_1 + m_2)$ – её приведённая масса, ω – частота вращения компонентов системы вокруг общего центра масс, r – расстояние от центра масс до компонентов, G – гравитационная постоянная, c – скорость света в вакууме. В случае атома водорода M , очевидно, с большой точностью равна массе ядра (массе протона), ω есть собственная частота электронного осциллятора, а r – радиус атома.

Используя принцип соответствия [2], формулу (1) можно представить в квантовом виде. Для этого необходимо произвести замену

$$r \rightarrow \langle r \rangle = \langle \Psi | r | \Psi \rangle, \quad (2)$$

учтя при этом, что волновая функция атома Ψ ,

$$\Psi(\mathbf{r}, t) = \sum C_j \Psi_j = \sum C_j \psi_j(\mathbf{r}) \times \exp(-iW_j t/\hbar), \quad (3)$$

является суперпозицией базисных состояний, энергии которых суть W_j .

Ограничиваясь для простоты рассмотрением лишь основного ($j = 0$) и первого возбуждённого ($j = 1$) состояний квантовой системы, а также предполагая [2], что $\psi_k^* \psi_l = \psi_k \psi_l^*$ для $\{k, l\} = \{0, 1\}$, имеем

$$\langle r \rangle = |C_0|^2 r_0 + |C_1|^2 r_1 + (2C_0^* C_1 \cos vt) \times \int \psi_0^*(\mathbf{r}) r \psi_1(\mathbf{r}) dV, \quad (4)$$

где $v = (W_1 - W_0)/\hbar$ – частота оптического перехода $1 \rightarrow 0$, а интегрирование ведётся по всему пространству с учётом спина.

Прямая подстановка (4) в (1) с учётом (2) показывает, что уже в простейшей бинарной квантовой системе «протон + электрон» помимо ожидаемых гравитационных волн, соответствующих движению электрона по боровским орбитам, возникают также высокочастотные гравитационные «биения», обусловленные последним слагаемым в (4). Данный результат показывает принципиальное отличие гравитационно-волновых микрогенераторов (электронные переходы в атомах) от известных к настоящему времени макрогенераторов (чёрные дыры).

Таким образом, следует ожидать, что вследствие существенного влияния квантовых эффектов создание высокочастотных источников гравитационных волн может оказаться более простой задачей по сравнению с разработкой традиционных низкочастотных генераторов [3]. В частности, мы предлагаем использовать когерентные оптические переходы в атомах в режиме вынужденной генерации (лазер) для получения гравитационных волн оптических частот [4, 5].

Список литературы

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 2. Теория поля. М.: Наука, 1973.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: Высшая школа, 2002.
3. Fomin I.V., et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1705(1). P. 012004.
4. Горелик В.С. и др. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2018. Т. 45. № 2. С. 10-21.
5. Filatov V.V., et al. // Materials Science Forum. 2021. V. 1047. P. 134-139.

Д.И. ХУСЯИНОВ, С.В. ОВЧАРЕНКО, А.А. ГУСЬКОВ,
А.М. БУРЯКОВ

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

УСИЛЕНИЕ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СТРУКТУРЕ WSe₂/FeCo

Приведены результаты генерации терагерцового (ТГц) излучения с поверхности тонких плёнок FeCo, выращенных на подложке из SiO₂, с нанесёнными слоями WSe₂ методом механической эксфолиации. Показано, что нанесение слоёв WSe₂ на поверхность тонких плёнок FeCo приводит к усилению ТГц-сигнала.

D.I. KHUSYAINOV, S.V. OVCHARENKO, A.A. GUSKOV,
A.M. BURYAKOV

MIREA – Russian Technological University, Moscow

ENHANCEMENT OF TERAHERTZ GENERATION IN WSe₂/FeCo STRUCTURE

The results of experiments on the generation of terahertz (THz) radiation from the surface of FeCo layers coated by WSe₂ layers are presented. It is shown that the coating of the FeCo layers by WSe₂ layers lead to increase of the emission of THz radiation.

Последние разработки в области наномagnetизма и спинтроники, позволили создать новый источник терагерцового (ТГц) излучения – спинтронный эмиттер. Физический механизм ТГц-излучения спинтронных эмиттеров основан на обратном спиновом эффекте Холла (ISHE), возникающем под воздействием фемтосекундного лазерного импульса [1 – 3]. Стоит отметить, что эффективность спинтронных излучателей сопоставима с известными типами источников ТГц-диапазона (например, с фотопроводящими антеннами и нелинейно-оптическими кристаллами).

В данной работе были рассмотрены возможности усиления параметров спинтронных ТГц-эмиттеров, с помощью покрытия их поверхности слоями WSe₂ методом механической эксфолиации. Исследования проводились на двух плёнках FeCo толщиной 20 и 40 нм. Образцы были выращены методом магнетронного распыления. Исследования проводились методом ТГц-спектроскопии временного разрешения в геометрии на отражение.

Было показано, что образцы имеют ярко выраженные магнитные свойства, так как с помощью приложения магнитного поля в 1 кЭ происходило изменение фазы генерируемых ТГц-импульсов, амплитуда которых изменялась в соответствии с магнитным гистерезисом. Покрытие поверхности плёнок FeCo монослоями WSe₂ с 10 % заполнением показало увеличению ТГц-сигнала на 20 %. Сделано предположение, что усиление ТГц-амплитуды может быть связано с механизмами обратной супердиффузии и/или генерации спин-поляризованных токов [4, 5].

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 21-79-10353.

Список литературы

1. Seifert T., et al. Efficient metallic spintronic emitters of ultrabroadband terahertz radiation // Nat. Photonics. 2016. V. 10. № 7. P. 483-488.
2. Kong D., et al. Broadband spintronic terahertz emitter with magnetic-field manipulated polarizations // Adv. Opt. Mater. 2019. V. 7. № 20. P. 1900487.
3. Khusyainov D., et al. Polarization control of THz emission using spin-reorientation transition in spintronic heterostructure // Sci. Rep. 2021. V. 11. № 1. P. 697.
4. Zhou B.T., et al. Spin-orbit coupling induced valley Hall effects in transition-metal dichalcogenides // Commun. Phys. 2019. V. 2. № 1. P. 26.
5. Khusyainov D., et al. Increasing the efficiency of a spintronic THz emitter based on WSe₂/FeCo // Materials (Basel). 2021. V. 14. № 21. P. 6479.

А.Э. АКМАЛОВ, К.И. КОЗЛОВСКИЙ, Г.Е. КОТКОВСКИЙ,
Ю.А. КУЗИЩИН, Е.М. МАКСИМОВ, И.Л. МАРТЫНОВ,
Е.В. ОСИПОВ, А.А. ПЛЕХАНОВ, А.А. ЧИСТЯКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ТЕРАГЕРЦОВЫЕ СПЕКТРЫ ОТРАЖЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ, РАСПОЛОЖЕННЫХ НА РАЗЛИЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

В настоящей работе с помощью метода терагерцового радиовидения со спектральным разрешением получены спектры отражения 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазациклогексана (RDX) в частотной области одной из характеристических полос поглощения этого вещества $\sim 0,8$ ТГц. При этом исследовались образцы RDX, расположенные на сильно- и слабоотражающих в терагерцовом диапазоне поверхностях.

A.E. AKMALOV, G.E. KOTKOVSKIY, K.I. KOZLOVSKIY,
Yu.A. KUZISHCHIN, I.L. MARTYNOV, E.M. MAKSIMOV,
E.V. OSIPOV, A.A. PLEKHANOV, A.A. CHISTYAKOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

TERAHERTZ REFLECTION SPECTRA OF ORGANIC SUBSTANCES LOCATED ON VARIOUS SURFACES

The reflection spectra of 1,3,5-trinitro-1,3,5-triazacyclohexane (RDX) were obtained in the frequency region of one of the characteristic absorption bands of this substance ~ 0.8 THz. The method of terahertz imaging with spectral resolution was used for this. We investigated RDX samples, located on surfaces with low and high reflectivity in the terahertz range.

Наличие характеристических полос поглощения и связанной с ними аномальной дисперсии в терагерцовом (ТГц) диапазоне частот для множества органических соединений [1] позволяет выполнять идентификацию и обнаружение этих веществ с помощью ТГц-спектроскопии.

В настоящей работе с помощью метода терагерцового радиовидения со спектральным разрешением [2] получены спектры отражения 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазаиклогексана (англ. RDX) в частотной области одной из характеристических полос поглощения этого вещества $\sim 0,8$ ТГц. При этом исследовались образцы RDX, расположенные на сильно- и слабоотражающих в ТГц-диапазоне поверхностях.

Для случая слабоотражающих поверхностей в спектре отражения наблюдается проявление аномальной дисперсии в виде пика в частотной области $\sim 0,8$ ТГц. В случае сильноотражающих поверхностей проявление аномальной дисперсии для RDX в частотной области $\sim 0,8$ ТГц отсутствует – вместо этого в спектрах отражения наблюдается локальный минимум, соответствующий полосе поглощения RDX.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке терагерцовых систем безопасности.

Список литературы

1. Palka N., Szala M. // J Infrared Milli Terahz Waves. 2016. V. 37. P. 977-992.
2. Akmalov A.E., Kotkovskii G.E., et al. // Proc. SPIE. 2020. V. 11542. P. 115420O.

П.Ю. АВДЕЕВ, Д.И. ХУСЯИНОВ, А.М. БУРЯКОВ, В.Р. БИЛЫК
МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ПЛЁНКИ FeCo НА ПАРАМЕТРЫ ГЕНЕРАЦИИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Приведены результаты экспериментального исследования генерации терагерцового (ТГц) излучения тонкими плёнками FeCo в зависимости от толщины. Продемонстрированы спектры и зависимости амплитуды индуцированных ТГц-импульсов от мощности возбуждающего фемтосекундного лазерного излучения. Показано изменение характера зависимости величины ТГц-сигнала от мощности оптической накачки для сверхтонких плёнок.

P.Yu. AVDEEV, D.I. KHUSYAINOV, A.M. BURYAKOV,
V.R. BYLIK
MIREA – Russian Technological University, Moscow

EFFECT OF FeCo FILM THICKNESS ON GENERATION OF TERAHERTZ RADIATION

The results of an experimental study of the generation of terahertz (THz) radiation by thin FeCo films depending on the thickness are presented. The spectra and dependences of the amplitude of the induced THz pulses on the optical pump power are demonstrated. The change in the character of the dependence of the THz signal on the optical pump power for ultrathin films is shown.

В последнее время особое внимание уделяется генерации терагерцового (ТГц) излучения спинтронными эмиттерами, в которых большую роль в генерации ТГц-излучения играет не только электрический заряд, как в полупроводниковых генераторах, но и спин электронов [1]. Излучатели представляют собой многослойные гетероструктуры, состоящие из ферромагнитных и немагнитных слоёв. Принцип работы основан на обратном спиновом эффекте Холла – преобразовании спинового тока, возникающего под действием фемтосекундных лазерных импульсов, в поперечный заряд немагнитных слоёв [2].

В данной работе использовались плёнки FeCo толщиной 10, 20 и 40 нм, полученные в результате магнетронного распыления мишеней на подложку SiO₂. Генерация ТГц-излучения с поверхности экспериментальных образцов была исследована методом терагерцовой

спектроскопии временного разрешения в геометрии на отражение аналогично работе [3]. В качестве луча накачки было использовано оптическое импульсное излучение с длительностью импульсов (~ 30 фс), зондирования – ближнее инфракрасное излучение (800 нм). Для исследования магнитных свойств плёнки образцы были помещены во внешнее магнитное поле величиной 1 кЭ, создаваемое внешним управляемым электромагнитом.

В ходе эксперимента были получены зависимости интенсивности генерации ТГц-излучения при различной мощности возбуждающего оптического излучения для каждого образца. Для плёнок толщиной 20 и 40 нм величина «размаха сигнала» ТГц-импульса от мощности накачки проявляет линейную зависимость. В плёнке толщиной 10 нм аналогичная зависимость выходит на насыщение в районе 60 мВт, что можно объяснить конечной величиной спинового тока, индуцирующего ТГц-излучение, в образцах с размерностью порядка 1 - 10 нм [4].

Анализ частотного спектра, полученного путём преобразования Фурье показал, что генерируемое излучение лежит в диапазоне 0,1 - 1,5 ТГц, с максимумом спектральной интенсивности в диапазоне 0,3 - 0,5 ТГц, что согласуется с работой [5]. Величина пикового значения обратно пропорциональна мощности накачки.

Изменение направления внешнего магнитного поля приводило к изменению фазы ТГц-импульса, что говорит о наличии в образцах магнитного гистерезиса. Полученные петли гистерезиса характеризуются схожей величиной коэрцитивной силы для всех образцов ($\sim 0,67$ кЭ) и ростом величины намагнитченности насыщения с увеличением мощности накачки и толщины плёнки.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 21-79-10353.

Список литературы

1. Papaioannou E.T., Beigang R. THz spintronic emitters: a review on achievements and future challenges // Nanophotonics. 2021. V. 10, № 4. P. 1243-1257.
2. Seifert T., et al. Efficient metallic spintronic emitters of ultrabroadband terahertz radiation // Nat. Photonics. 2016. V.10. № 7. P. 483-488.
3. Khusyainov D., et al. Polarization control of THz emission using spin-reorientation transition in spintronic heterostructure // Sci. Rep. 2021. V. 11. № 1. P. 697.
4. Burkert T., et al. Giant magnetic anisotropy in tetragonal FeCo alloys // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 93. № 2. P. 027203.
5. Hilton D.J., et al. Terahertz emission via ultrashort-pulse excitation of magnetic metal films // Opt. Lett. 2004. V. 29. № 15. P. 1805.

Е.О. ЕПИФАНОВ, Н.В. МИНАЕВ, В.И. ЮСУПОВ

*Институт фотонных технологий
ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Троицк*

ОСОБЕННОСТИ ФОКУСИРОВКИ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА ПРИ АБЛЯЦИИ В СВЕРХКРИТИЧЕСКОМ CO_2

При абляции мишени в сверхкритическом диоксиде углерода (scCO_2) наблюдаемый поперечный размер области воздействия значительно превышает аналогичный размер при абляции в воздухе. Цель работы заключалась в попытке объяснить полученный эффект и установить происходит ли изменение радиуса перетяжки при абляции в сверхкритическом флюиде. Проводилась абляция мишени из серебра наносекундными импульсами на воздухе и в scCO_2 . Показано, что расширение области воздействия в scCO_2 происходит без увеличения радиуса перетяжки из-за флуктуаций траектории лазерного пучка.

E.O. EPIFANOV, N.V. MINAEV, V.I. YUSUPOV

Institute of Photon Technologies of FSRC «Crystallography and Photonics» RAS, Troitsk

FEATURES OF FOCUSING OF A LASER BEAM OF LASER ABLATION IN SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE

During ablation of a metal target in supercritical carbon dioxide (scCO_2), the observed transverse size of the affected area is much larger than that for ablation in air. The aim of this work was to try to explain the obtained effect and to establish whether the waist radius changes during ablation in a supercritical fluid. The silver target was ablated by nanosecond pulses in air and in scCO_2 . It is shown that the expansion of the impact area in scCO_2 occurs without increasing the waist radius due to fluctuations in the trajectory of the laser beam.

Сочетание сверхкритических флюидных (СКФ) и лазерных технологий предоставляет уникальные возможности для синтеза наночастиц и микроструктурирования различных материалов. Недавно авторами обнаружен интересный эффект значительного увеличения области воздействия лазерного излучения на поверхность мишени во время абляции в scCO_2 , по сравнению с аналогичной областью для воздуха. В работе использовался волоконный лазер с $\lambda = 1064$ нм, энергией в импульсе 1 мДж, $\tau = 5$ нс и $\nu = 15$ кГц. Мишень была закреплена в реакторе высокого давления на подвижном держателе. Была проведена серия экспериментов по абляции мишени в двух средах с различным количеством импульсов (1 - 1000).

Как видно из рис. 1, размер лазерной перетяжки при абляции в скCO_2 не изменяется. В то же время наблюдается значительное расширение размера пятна с увеличением количества импульсов. В качестве возможного объяснения наблюдаемого расширения пятна рассматривалось влияние выбросов плазмы, материала мишени и возникающих конвективных потоков. Поскольку при абляции на воздухе первые два фактора тоже присутствуют, то можно заключить, что расширение пятна связано с возникновением конвективных потоков, вызванных лазерным нагревом мишени. Конвективные потоки, возникающие на воздухе, оказывают существенно меньшее влияние на распространение лазерного пучка из-за значительно более низкой плотности.

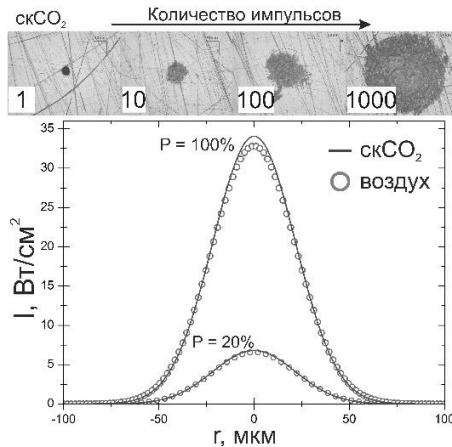


Рис. 1. Фотография поверхности мишени после лазерной абляции в скCO_2 разным количеством импульсов и распределение интенсивности в лазерном пятне, определённое по следам воздействия в воздухе и в скCO_2

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части развития лазерных технологий и Российского фонда фундаментальных исследований.

В.Ю. ЖЕЛЕЗНОВ, Т.В. МАЛИНСКИЙ, В.Е. РОГАЛИН
Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург

МОДЕРНИЗАЦИЯ АНАЛОГОВОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИЛД-2М

Показана возможность модернизации аналоговых приборов с помощью микроконтроллера Arduino Uno, на примере измерителя ИЛД-2М, который был использован в установке для измерения коэффициента отражения материалов.

V.Yu. ZHELEZNOV, T.V. MALINSKIY, V.E. ROGALIN
Institute of Electrophysics and Electric Power of RAS, Saint-Petersburg

MODERNIZATION OF THE ANALOG METER OF LASER RADIATION ENERGY ILD-2M

The possibility of modernizing analog devices with the help of the Arduino Uno microcontroller, based on the ILD-2M, which was used in the installation for measuring the reflection coefficient of materials, is shown.

Аналоговое оборудование может иметь хорошие технические характеристики, но отображение полученной информации неудобно, и требует больших временных затрат на записи полученных результатов измерений и проведение расчётов.

Целью работы является модернизации аналогового измерителя для лазерной дозиметрии ИЛД-2М [1, 2] с помощью контроллера Arduino Uno. ИЛД-2М был прокалиброван с помощью портативного измерителя мощности и энергии лазеров Nova II (Ophir Optronics Solutions Ltd., Israel). В работе использовался УФ-лазер ($E_{\text{им}} = 8$ мДж, 355 нм, 10 нс). Модернизированный прибор апробирован при измерении влияния интенсивности излучения на коэффициент отражения полупроводников. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки.

NOVA II и ИЛД-2М преобразуют оптический сигнал в электрический. При калибровке, проведённой до измерений, Nova II (11), использовался в качестве эталона. Он помещался в положение (7). Так проводили калибровку измерителя ИЛД-2М (5) относительно NOVA II (11). Излучение проходило через затвор (2) отражалось кварцевой пластиной (3) на полупрозрачную пластину (4) и попадало на измерительную головку (5) ИЛД-2М. В зависимости от изменения измеренной энергии излучения соответственно изменялось напряжение на выходе блока

питания и регистрации (БПР) (10), который является разъёмом для подключения внешнего регистратора. Через данный выход БПР был подключен к микроконтроллеру Arduino Uno (12), который использовался в качестве аналогово-цифрового преобразователя (АЦП). Измеритель NOVA 2, к которому подключен пирозлектрический датчик, также был присоединён к Arduino Uno. Данные, полученные с помощью Arduino Uno, выводились в терминал компьютера через USB порт. На рис. 2 показана зависимость измеренной энергии лазерного излучения от напряжения, считываемого с БПР ИЛД-2М. Была получена формула расчёта измеренной энергии: $E = 0,0076 \cdot U + 0,2414$, где U – напряжение БПР. Величина аппроксимации составляла 0,9962.

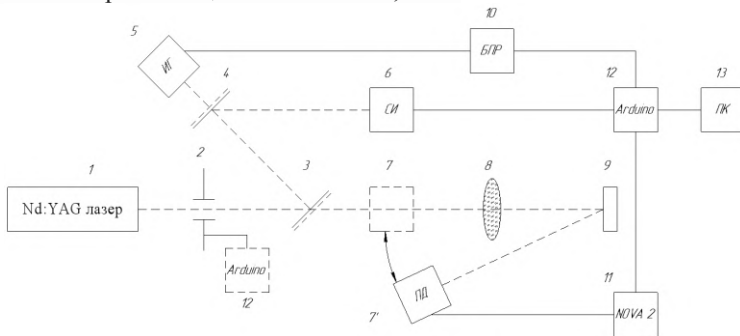


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – Nd:YAG лазер; 2 – затвор; 3, 4 – кварцевые пластины; 5 – измерительная головка ИЛД-2М; 6 – счётчик импульсов; 7, 7' – пирозлектрический датчик для измерения энергии излучения; 8 – линза; 9 – образец; 10 – БПР; 11 – измеритель излучения NOVA II; 12 – Arduino Uno; 13 – компьютер

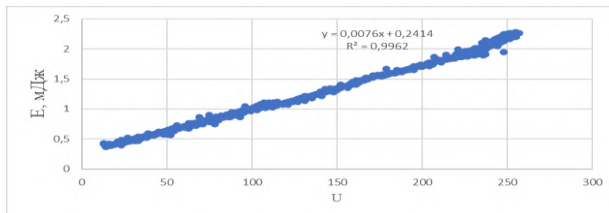


Рис. 2. Зависимость измеренной энергии лазерного излучения от напряжения считываемого с блока питания и регистрации ИЛД-2М

Список литературы

1. Жевлаков А.П., Исаков В.К., Лещенко Д.О. // Квантовая электроника. 1990. Т. 17 (8). С. 1029-1030.
2. Рахманов Б.Н., Кибовский В.Т. // Безопасность в техносфере. 2013. Т. 2. (6). С. 3-13.

И.А. ДЕРМЕНЖИ, С.Ю. БАРЫШНИКОВА, Д.Н. КОЧУРОВА¹,
А.И. КАЛУГИН¹

Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова

¹Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН

ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ОТРАЖЁННОГО ОТ ЛАМБЕРТОВА КРУГЛОГО ОТРАЖАТЕЛЯ

Представлена теоретическая модель для расчёта мощности лазерного излучения, принятой после отражения гауссова пучка от круглого ламбертова отражателя. Экспериментально получены мощности лазерного излучения, отражённого от бумажных белых дисков различного радиуса, в зависимости от дистанции от фотоприёмника до объекта. Установлено соответствие теоретической модели экспериментальным зависимостям.

I.A. DERMENZHI, S.Yu. BARYSHNIKOVA,
D.N. KOCHUROVA¹, A.I. KALUGIN¹

Kalashnikov Izhevsk State Technical University

¹Udmurt Federal Research Center of Ural Branch of the RAS

MEASURING OF LASER RADIATION POWER REFLECTED FROM LAMBERT CIRCULAR REFLECTOR

A theoretical model for calculating the power of laser radiation received after reflection of a Gaussian beam from a circular Lambert reflector is presented. The power of laser radiation reflected from paper white disks of various radii, depending on the distance from the photodetector to the object, was experimentally obtained. The correspondence of the theoretical model to the experimental dependences has been established.

Для расчёта мощности лазерного излучения, принятой после отражения от объекта, вводится такое понятие как эффективная площадь отражения (ЭПО) σ [1]. При выполнении следующих условий: приёмник и источник лазерного излучения являются точечными, круглый объект является ламбертовым отражателем (отражательная способность объекта одинакова во всех направлениях и равна коэффициенту диффузного отражения ρ_t [2]), распределение мощности лазерного излучения имеет гауссову зависимость, излучение падает на объект нормально, выражение для σ имеет вид:

$$\sigma = p_t \cdot \pi w^2 [1 - \exp(-\frac{r_t^2}{w^2})], \quad (1)$$

где w – ширина лазерного пучка в плоскости объекта (зависит от квадрата расстояния до объекта), r_t – радиус объекта (диска).

При этом мощность P , принятая фотоприёмником, прямо пропорциональна ЭПО:

$$P = k \cdot \sigma, \quad (2)$$

где k – коэффициент пропорциональности.

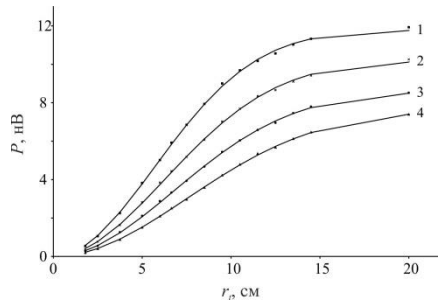


Рис. 1. Мощность P , отражённая от бумажных дисков радиусом r_t для расстояний $l = 315$ (1), 340 (2), 370 (3) и 397 см (4)

На рис. 1 представлены результаты измерений мощности, принятой после отражения лазерного излучения (расходимость 52 мрад) от бумажных белых дисков ($p_t = 0.64$), в зависимости от их радиусов, при различном расстоянии l до фотоприёмного устройства. Сплошными линиями представлены теоретические зависимости мощности принятого излучения, точками – экспериментальные данные. Экспериментальные результаты хорошо аппроксимируются теоретическими кривыми. Анализ полученных результатов показал, что при увеличении расстояния до объекта мощность излучения обратно пропорциональна квадрату расстояния при больших радиусах дисков. С увеличением радиуса диска отражённая мощность возрастает и стремится к постоянной величине, пропорциональной P_t / l^2 , где P_t – полная мощность лазерного излучения.

Список литературы

1. Барышникова С.Ю., Карпиков Б.Н., et. al. // IX Международная конференция по фотонике и информационной оптике. 2020. Р. 459.
2. Nicodemus F.E., Richmond J.C., Hsia J.J., Ginsgerb I.W., Limperis T. // National Bureau of Standards, U.S. Department of Commerce. 1977.

А.Г. ШУБНЫЙ, Е.О. ЕПИФАНОВ, Н.В. МИНАЕВ, В.И. ЮСУПОВ

*Институт фотонных технологий
ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Троицк*

ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЕ ЖИДКОСТНОЕ ТРАВЛЕНИЕ ЛЕЙКОСАФИРА ПРИ ПОВЫШЕННОМ ДАВЛЕНИИ

Представляемая работа посвящена исследованию процесса и отработке различных режимов лазерно-индуцированного обратного жидкостного травления (ЛИЖТ) лейкосапфира при повышенном давлении рабочей среды. Приведены результаты лазерно-индуцированного микроструктурирования образцов при различных диапазонах давлений до 250 атм. Полученные результаты свидетельствуют о значительном увеличении эффективности процесса ЛИЖТ, а также о возможности формирования микроструктур с высоким аспектным отношением в случае использования повышенного давления рабочей среды.

A.G. SHUBNIY, E.O. EPIFANOV, N.V. MINAEV, V.I. YUSUPOV
Institute of Photon Technologies of FSRC «Crystallography and Photonics» RAS, Troitsk

EFFICIENCY OF LASER-INDUCED BACKSIDE WET MICROSTRUCTURING OF SAPPHIRE WITH INCREASED PRESSURE

This work is devoted to the study and implementation of laser-induced backside wet etching (LIBWE) of sapphire with increased pressure. The results of laser-induced microstructuring of samples at various pressure of working liquid ranges up to 250 atm are presented. The obtained results indicate a significant increase in the efficiency of the LIBWE process, as well as the possibility of a high aspect ratio microstructures formation in the case of increased pressure.

В настоящее время задача микрообработки сверхтвёрдых оптически прозрачных материалов представляет большой интерес как с практической точки зрения, так и с научной. Одной из технологий позволяющих решить эту задачу как для материалов органической, так и неорганической природы является технология LIBWE (Laser-induced backside wet etching). С её помощью удаётся обрабатывать такие материалы как, например, стекло, кварц, синтетический сапфир (Al_2O_3) и другие прозрачные оптические материалы. Ключевыми параметрами, влияющими на эффективность травления, являются используемая среда и параметры используемого лазерного излучения.

Предложенный способ улучшения технологии LIBWE состоит в том, что давление в рабочей среде повышается, в результате чего парогазовые пузырьки уменьшаются в размерах, а приток вещества в труднодоступные области усиливается. Было показано, что эффективность процесса LIBWE при увеличении давления в рабочей среде с 1 до 250 атм повышается в 2 раза [1]. Было показано, что максимальная глубина канала диаметром 50 мкм, формируемого методом LIBWE, возрастает с 0.8 до 6.4 мм, при увеличении давления рабочей среды с 1 до 160 атм.

В установке (рис. 1) источником излучения служил лазер 527 нм наносекундной длительности импульса на частоте 1 кГц (4). Ячейка высокого давления (1) представляла собой толстостенный металлический реактор с двумя сапфировыми окнами, на одном из которых проводилось травление. Ячейка закреплялась на высокоточном трёхкоординатном моторизованном столе (5). Излучение фокусировалось на обратную сторону сапфирового стекла (2) F-theta объективом (3). В первом эксперименте в качестве рабочей среды использовался насыщенный при комнатной температуре водный раствор AgNO_3 , во втором – толуол. Фотография образца приведена на рис. 2.

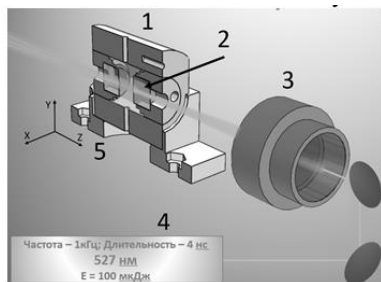


Рис.1. Схема установки

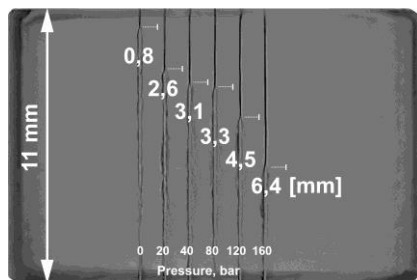


Рис.2. Фотография образца с каналами

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках Государственного задания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части развития лазерных информационных технологий и Российского фонда фундаментальных исследований, грант РФФИ 18-29-06056 в части сверхкритических флюидных технологий.

Список литературы

1. Tadate S., Narazaki A., Niino H. Fabrication of micropits by LIBWE for laser marking of glass materials // Journal of Laser Micro Nanoengineering. 2017. V. 12 (3). P. 248-253.

Л.Н. БОРОДИНА, И.А. ВОВК, Д.П. ПОДГОРНОВ,
М.С. СТЕПАНОВА, В.В. ЗАХАРОВ, А.Ю. ДУБОВИК,
А.О. ОРЛОВА, А.В. ВЕНИАМИНОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ЛАЗЕРНАЯ МИКРОСКОПИЯ МАГНИТОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ УГЛЕРОДНЫХ ГЕТЕРОНАНОКОМПОЗИТОВ

Рассмотрены результаты исследования подвижности магнитолюминесцентных углеродных гетеронанокомпозигов и продуктов их фототрансформации в постоянном внешнем магнитном поле и без него средствами лазерной сканирующей конфокальной микроскопии. По изменениям пространственного распределения интенсивности люминесценции и поглощения обесцвеченной области определены гидродинамические размеры нескольких компонентов. Обнаружено направленное движение в постоянном магнитном поле.

L.N. BORODINA, I.A. VOVK, D.P. PODGORNOV,
M.S. STEPANOVA, V.V. ZAKHAROV, A.Yu. DUBAVIK,
A.O. ORLOVA, A.V. VENIAMINOV
ITMO University, Saint-Petersburg

LASER MICROSCOPY OF MAGNETOLUMINESCENT CARBON HETERONANOCOMPOSITES

The results on the mobility of magnetoluminescent carbon heteronanocomposites and products of their phototransformation in an external magnetic field and without it studied by laser scanning confocal microscopy are considered. By monitoring the changes in the spatial distribution of luminescence intensity and absorption of the exposed region, the hydrodynamic sizes of several components were determined. Their drift in a permanent magnetic field was detected.

Магнитолюминесцентные гетеронанокомпозицы, соединяющие в себе суперпарамагнитные наночастицы Fe_3O_4 (SPIONs) и эффективно люминесцирующие биосовместимые углеродные точки, чрезвычайно привлекательны для различных биомедицинских приложений [1].

Исследование магнитных и люминесцентных свойств гетеронанокомпозигов проведено с помощью конфокального лазерного сканирующего микроскопа LSM710 (Zeiss), позволяющего не только получать люминесцентное изображение, но и измерять пространственное

и спектральное распределение её интенсивности, а также экспонировать выбранные области лазерным излучением и следить за их изменением.

Зарегистрировано характерное для углеродных точек смещение спектра люминесценции при увеличении длины волны возбуждения (рис. 1). Воздействие на гетеронаноккомпозиты интенсивным излучением лазера микроскопа приводит к их фототрансформации с выделением и агрегацией магнитной составляющей, что проявляется в локальном снижении прозрачности раствора (рис. 2).

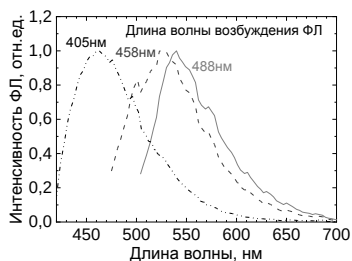


Рис. 1. Спектры люминесценции гетеронаноккомпозитов, зарегистрированные с помощью микроскопа LSM710 при возбуждении лазером с длиной волны 405, 458 и 488 нм



Рис. 2. Микроскопическое изображение экспонированной области с продуктами фототрансформации гетеронаноккомпозитов через два часа после засветки, видно пространственное разделение компонент

Эволюция экспонированной области обнаруживает по меньшей мере четыре фракции продуктов, различающихся своим поведением и скоростью диффузии, а также движением в магнитном поле. Наблюдается как диффузионное расширение облака, так и сжатие в жгут, и его коллективное движение. Коэффициенты диффузии и скорости дрейфа определены с помощью подхода, близкому описанному в [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта НИРМА ФТ МФ Университета ИТМО (Л.Б., И.В., М.С.) и Минобрнауки РФ, госзадание № 2019-1080.

Список литературы

1. Perelshtein I., et al. Bifunctional carbon dots — magnetic and fluorescent hybrid nanoparticles for diagnostic applications // *Nanomaterials*. 2020. V. 10. No. 7. P. 1384.
2. Xiong R., Deschout H., Demeester J., De Smedt S.C., Braeckmans K. Rectangle FRAP for measuring diffusion with a laser scanning microscope // *Fluorescence Spectroscopy and Microscopy: Methods and Protocols, Methods in Molecular Biology*. 2013. V. 1076. P. 433-441.

М.Н. КОВАЛЕНКО, Н.А. АЛЕКСЕЕНКО, Л.В. МАРКОВА¹,
Л.С. РУТКОВСКАЯ, А.П. ЗАЖОГИН

Белорусский государственный университет, Минск
¹Институт порошковой металлургии, Минск, Беларусь

**ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ НАНОПОРОШКОВ
ПРЕКУРСОРОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ АЛЮМИНАТОВ МЕДИ
CuAlO₂ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СДВОЕННЫХ ЛАЗЕРНЫХ
ИМПУЛЬСОВ НА СПЛАВЫ АД1 И М2
В АТМОСФЕРЕ ВОЗДУХА**

Проведено исследование процессов образования смешанных нанопорошков Al, оксидов меди и алюминия, прекурсоров для получения плёнок алюминатов меди типа CuAlO₂ при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на гибридную мишень из сплавов АД1 и М2. Показано, что последовательное воздействие серий сдвоенных лазерных импульсов с энергией 53 мДж и между импульсным интервалом 10 мкс на гибридную мишень, состоящую из пластинок алюминия и меди, даёт возможность получения прекурсоров для получения наноплёнок шпинелей типа CuAlO₂.

M.N. KOVALENKO, N.A. ALEKSEENKO, L.V. MARKOVA¹,
L.S. RUTKOVSKYA, A.P. ZAJOGIN

Belarusian State University, Minsk
¹Powder Metallurgy Institute, Minsk, Belarus

**THE PROCESSES OF FORMATION OF PRECURSOR
NANOPOWDERS FOR THE PRODUCTION
OF CuAlO₂ COPPER ALUMINATES UNDER THE INFLUENCE
OF DOUBLE LASER PULSES ON AD1 AND M2 ALLOYS
IN THE AIR ATMOSPHERE**

The processes of formation of mixed Al nanopowders, copper and aluminum oxides, precursors for the production of CuAlO₂-type copper aluminate films under the influence of double laser pulses on a hybrid target made of AD1 and M2 alloys have been studied. It is shown that the sequential action of a series of twin laser pulses with an energy of 53 mJ and between a pulse interval of 10 microseconds on a hybrid target consisting of aluminum and copper plates makes it possible to obtain precursors for the production of spinel nanofilms of the CuAlO₂ type.

Алюминат меди CuAlO₂ является полупроводником, прозрачным для видимого света. CuAlO₂ имеет широкую полосу пропускания ~ 3,5 эВ.

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 алюминия и меди, в воздушной атмосфере нанопорошков Al, оксидов Cu, Al для использования в технологиях получения нанокерамик типа CuAlO_2 .

Для проведения исследований использовали лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1. На рис. 1а приведены результаты, полученные при последовательном воздействии серии сдвоенных импульсов на гибридную мишень, состоящую из пластинок сплавов АД1 и М2, склеенных между собой при энергии импульсов 53 мДж и межимпульсном интервале 10 мкс. Количество импульсов – 150. Толщина пластинок Al и Cu 0,3 мм.

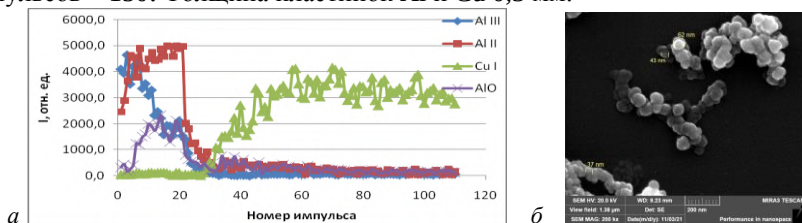


Рис. 1. Зависимость интенсивности линий от количества импульсов (а); изображения наночастиц и агломератов осевших на дно кюветы (б)

Исходя из полученных данных, для оценки возможности практического получения смешанных нанопорошков оксидов алюминия и меди были использованы энергия импульсов 53 мДж, интервал между импульсами 10 мкс. Облучение проводили в течении 10 минут сериями из 250 сдвоенных импульсов на одну точку мишени, помещённую в закрытую стеклянную кювету размером 40 x 20 x 30 мм.

Для анализа получаемых продуктов, осевших на поверхность пластинок из кремния, установленных вне зоны распространения лазерного факела (на дне и одной из сторон), использовался сканирующий электронный микроскоп высокого разрешения MIRA3 с рентгеноспектральным микроанализатором EDX X-Max. Изображения наночастиц и агломератов, синтезированных при воздействии серий последовательных сдвоенных лазерных импульсов на гибридную мишень, приведены на рис. 1б. Размер первичных частиц, оценённый с помощью электронной микроскопии высокого разрешения составил от 20 до 65 нм, частицы собраны в агломераты и имеют кристаллическую структуру и сферическую форму.

М.Н. КОВАЛЕНКО, Н.А. АЛЕКСЕЕНКО, Л.В. МАРКОВА¹,
Л.С. РУТКОВСКАЯ, М.П. ПАТАПОВИЧ, А.П. ЗАЖОГИН

Белорусский государственный университет, Минск
¹Институт порошковой металлургии, Минск, Беларусь

**ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ НАНОПОРОШКОВ
ПРЕКУРСОРОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ШПИНЕЛЕЙ ТИПА
 CuAl_2O_4 ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СДВОЕННЫХ ЛАЗЕРНЫХ
ИМПУЛЬСОВ НА СПЛАВЫ АД1 И М2
В АТМОСФЕРЕ ВОЗДУХА**

Проведено исследование процессов образования смешанных нанопорошков Al, оксидов меди и алюминия, прекурсоров для получения плёнок шпинелей типа CuAl_2O_4 при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на гибридную мишень из сплавов АД1 и М2. Показано, что последовательное воздействие серий сдвоенных лазерных импульсов с энергией 53 мДж и между импульсным интервалом 10 мкс на гибридную мишень, состоящую из пластинок алюминия и меди, даёт возможность получения прекурсоров для получения наноплёнок шпинелей типа CuAl_2O_4 .

M.N. KOVALENKO, N.A. ALEKSEENKO, L.V. MARKOVA¹,
L.S. RUTKOVSKAYA, M.P. PATAPOVICH, A.P. ZAJOGIN

Belarusian State University, Minsk
¹Powder Metallurgy Institute, Minsk, Belarus

**THE PROCESSES OF FORMATION OF PRECURSOR
NANOPOWDERS FOR THE PRODUCTION
OF CuAl_2O_4 SPINELS UNDER THE INFLUENCE
OF DOUBLE LASER PULSES ON AD1 AND M2 ALLOYS
IN THE AIR ATMOSPHERE**

The processes of formation of mixed Al nanopowders, copper and aluminum oxides, precursors for the production of spinel films of the CuAl_2O_4 type under the influence of twin laser pulses on a hybrid target of AD1 and M2 alloys were studied. It is shown that the sequential action of a series of twin laser pulses with an energy of 53 mJ and between a pulse interval of 10 mcs on a hybrid target consisting of aluminum and copper plates makes it possible to obtain precursors for the production of spinel nanofilms of the CuAl_2O_4 type.

Цель работы состояла в том, чтобы показать возможность и определить условия для получения методом последовательного

Х. БАЗЗАЛ, Н.А. АЛЕКСЕЕНКО, Е.С. ВОРОПАЙ,
М.Н. КОВАЛЕНКО, Н.Х. ЧИНЬ, А.П. ЗАЖОГИН

Белорусский государственный университет, Минск

**ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ
НАНОПОРОШКОВ Al_2O_3 И Al ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ
РАСФОКУСИРОВАННЫХ СДВОЕННЫХ ЛАЗЕРНЫХ
ИМПУЛЬСОВ НА АЛЮМИНИЙ В АТМОСФЕРЕ ВОЗДУХА**

Изучено влияние расфокусировки сдвоенных лазерных импульсов на состав лазерной плазмы. При значении величины расфокусировки 1 мм проведены исследование процессов образования смешанных нанопорошков Al_2O_3 и Al при воздействии сдвоенных лазерных импульсов энергией 53 мДж и межимпульсном интервалом 10 мкс на алюминиевую мишень, помещённую в закрытую стеклянную прямоугольную кювету. Размер первичных частиц Al_2O_3 оцененный с помощью электронной микроскопии высокого разрешения, преимущественно составил 30 - 40 нм, а Al – 45 - 60 нм. Частицы собраны в агломераты.

Kh. BAZZAL, N.A. ALEKSEENKO, E.S. VOROPAY,
M.N. KOVALENKO, N.H. TRINH, A.P. ZAJOGIN

Belarusian State University, Minsk

**STUDIES OF THE FORMATION OF Al_2O_3 AND Al
NANOPOWDERS UNDER THE INFLUENCE
OF DEFOCUSED DUAL LASER PULSES
ON ALUMINUM IN THE AIR ATMOSPHERE**

The effect of double laser pulse defocusing on the composition of laser plasma has been studied. At a defocusing value of 1 mm, the processes of formation of mixed Al_2O_3 and Al nanopowders were studied when exposed to twin laser pulses with an energy of 53 MJ and an inter-pulse interval of 10 mcs on an aluminum target placed in a closed rectangular glass cuvette, the size of primary Al_2O_3 particles estimated using high-resolution electron microscopy was mainly 30 - 40 nm, and Al – 45 - 60 nm. The particles are collected into agglomerates.

Теплопроводящие керамические подложки изготовленные на основе нанопорошков оксида алюминия (Al_2O_3) и Al многократно превосходят эластичные листовые материалы типа КПТД и слюду по теплопроводности ($25 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$) и электрической прочности ($25 \text{ кВ} \cdot \text{мм}^{-1}$), обеспечивая отличные условия эксплуатации приборов независимо от их

мощности. Цель работы состояла в том, чтобы показать возможность и определить условия для получения методом абляции сериями расфокусированных сдвоенных лазерных импульсов алюминиевых мишеней в воздушной атмосфере нанопорошков Al и Al_2O_3 для использования в технологиях получения нанокерамик для микроэлектроники.

Для проведения исследований использовали лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1. Динамику процессов образования нанопорошков при воздействии серий расфокусированных сдвоенных лазерных импульсов на пластинку из алюминиевого сплава АД1. Результаты исследований, полученные при использовании энергии импульсов, равной 52 мДж и интервале между импульсами 10 мкс, представлены на рис. 1а.

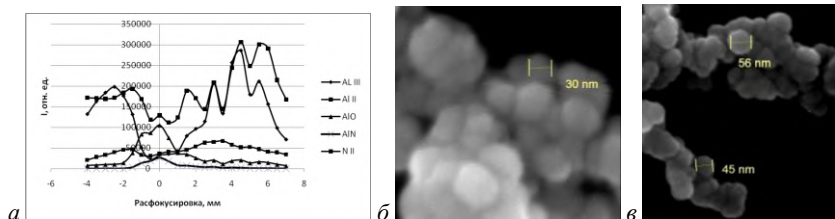


Рис. 1. Зависимость интенсивности линий от расфокусировки (а); изображения наночастиц и агломератов, осевших на дно кюветы: Al_2O_3 (б); Al (в)

При расфокусировке более ± 1 мм интенсивность линии ионов Al III увеличивается в несколько раз в сравнении с нулевой расфокусировкой, интенсивность линий ионов Al II, N II также монотонно увеличивается. Одновременно с этим интенсивность полос AlO практически становится равным нулю, что ещё раз в какой-то мере подтверждает механизм образования оксидов и нитридов алюминия из ионов алюминия Al III и воздуха. Исходя из полученных данных, для оценки возможности практического получения смешанных нанопорошков Al_2O_3 и Al были использованы энергия импульсов 53 мДж, интервал между импульсами 10 мкс, расфокусировка 1 мм. Облучение проводили сериями из 50 сдвоенных импульсов на одну точку в течении 10 минут на мишень, помещённую в закрытую стеклянную кювету размером 40 x 20 x 30 мм. Изображения наночастиц и агломератов наночастиц, полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа MIRA3 с рентгеноспектральным микроанализатором EDX X-Max приведены на рис. 1б и 1в.

А.А. МОРОЗОВА, Д.С. ЛУТОШИНА, Я.М. АНДРЕЕВА,
Г.В. ОДИНЦОВА

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МЕТОДА ЛАЗЕРНОГО ОКРАШИВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СЕРЕБРА ПУТЁМ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАЗМОННЫХ НАНОЧАСТИЦ

В данной работе продемонстрирован и изучен метод создания цветных покрытий на поверхности серебра путём прямой лазерной обработки. Цвет поверхности при этом обуславливается образованием тонкого слоя наночастиц серебра, который при освещении белым светом проявляет плазмонные свойства. Получаемое покрытие исследовано на химическую, химико-механическую и термическую устойчивость. На основании результатов предложено лакокрасочное покрытие, приводящее к минимальным изменениям колориметрических характеристик.

A.A. MOROZOVA, D.S. LUTOSHINA, Ya.M. ANDREEVA,
G.V. ODINTSOVA

ITMO University, Saint-Petersburg

THE WEAR RESISTANCE OF THE METHOD OF LASER COLORING OF THE SILVER SURFACE BY FORMATION OF PLASMON NANOPARTICLES

In this work, a method for creating colored coatings on a silver surface by direct laser processing is demonstrated and studied. In this case, the surface color is due to the formation of a thin layer of silver nanoparticles, which exhibits plasmonic properties when illuminated with white light. The resulting coating was tested for chemical, chemical-mechanical and thermal resistance. Based on the results, a paint-and-lacquer coating is proposed that leads to minimal changes in colorimetric characteristics.

Лазерный метод окрашивания драгоценных металлов имеет ряд преимуществ в сравнении с традиционными [1]. Однако недостатком данного метода является неустойчивость получаемых цветных изображений [2]. Для использования данной технологии в промышленности необходима разработка защитного покрытия, которое позволит сохранять получаемые цвета.

Возникновение цвета на поверхности драгоценных металлов связано с формированием наночастиц с плазмонными свойствами в результате

лазерной абляции материала и обратного осаждения части испарённого металла обратно на подложку [3]. Цвет получаемого покрытия зависит от размера наночастиц, а также от их распределения. Однако замечено, что с течением времени, а также при химическом и механическом воздействии на обработанную поверхность происходит затухание плазмонных свойств.

Для решения проблемы изменения колориметрических свойств полученных структур был изучен процесс формирования и изменения цвета поверхности серебра. Для этого путём прямой лазерной обработки построчным сканированием с перекрытием по одной оси были подготовлены образцы цветных покрытий на пластинах серебра 999 пробы. В качестве лазерного источника был использован волоконный иттербиевый лазер с длиной волны 1,064 мкм и наносекундной длительностью импульса. Подготовленные образцы были изучены с помощью оптической микроскопии, спектрофотометрии, СЭМ и EDX. На основании полученных результатов было определено, что наночастицы в результате воздействия формируют зоны с различными колориметрическими характеристиками и соответствующими размерами наночастиц, по мере отдаления от области лазерного облучения.

Для выбора защитного покрытия было определено влияние на обработанную поверхность воздействия спирта, ацетона, воды и масла, составляющих основу защитных покрытий. Образцы с защитным покрытием были проверены на термическую и химико-механическую устойчивость. На основании полученных результатов было выбрано лакокрасочное покрытие на основе спирторастворимого полимера.

В результате данной работы был изучен механизм формирования цвета на поверхности серебра, а также исследована износостойкость получаемых покрытий из наночастиц. Показано, что защитное покрытие на основе спирторастворимого полимера является наиболее предпочтительным методом сохранения лазерно-индуцированных цветных изображений на поверхности драгоценных металлов, так как оно приводит к минимальным изменениям колориметрических характеристик.

Работа поддержана грантом РФФИ № 19-79-10208.

Список литературы

1. Andreeva Ya.M., et. al. Laser coloration of metals in visual art and design //Optical Materials Express. 2019. V. 9. No. 3. P. 1310-1319.
2. Guay J.M., et. al. Passivation of plasmonic colors on bulk silver by atomic layer deposition of aluminum oxide // Langmuir. 2018. V. 34. No. 17. P. 4998-5010.
3. Odintsova G.V., et. al. High-resolution large-scale plasmonic laser color printing for jewelry applications // Optics Express. 2019. V. 27. No. 3. P. 3672-3681.

Е.И. ВЕДЕНИН, В.Е. ПРИВАЛОВ¹, В.Г. ШЕМАНИН

Новороссийский политехнический институт (филиал) КубГТУ

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ОСЛАБЛЕНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СРЕДНЕГО ОБЪЁМНО-ПОВЕРХНОСТНОГО ДИАМЕТРА АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ

Контроль параметров аэрозольных частиц в выбросах промышленного производства, таких как средний объёмно-поверхностный диаметр частиц, является актуальной задачей. Определение указанного диаметра возможно путём обработки параметров сигналов ослабленного лазерного излучения по известным зависимостям среднего объёмно-поверхностного диаметра от параметров ослабления. Значение среднего объёмно-поверхностного диаметра позволяет восстанавливать функцию распределения частиц по размерам и таким образом оценивать дисперсный состав аэрозолей.

E.I. VEDENIN, V.E. PRIVALOV¹, V.G. SHEMANIN

Novorossiysk Polytechnic Institute of Kuban State Polytechnic University

¹Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

LASER SYSTEM OF DIFFERENTIAL EXTINCTION FOR THE AEROSOL PARTICLES AVERAGE VOLUME-SURFACE DIAMETER MEASUREMENT

Aerosol particles parameters control in the industrial production emissions, such as average volume-surface particles diameter, is the actual task. This diameter determination is possible by the laser radiation extinction signals parameters processing at the known average volume-surface particles diameter on the extinction parameters dependencies. The average volume-surface particles diameter value allows to reconstruct the particles size distribution function and thus to evaluate the aerosols disperse composition.

Средний объёмно-поверхностный диаметр частиц можно определить, исходя из зависимости усреднённого фактора эффективности ослабления от среднего объёмно-поверхностного диаметра [1]. По известным зависимостям усреднённого фактора эффективности ослабления на трёх длинах волн от среднего объёмно-поверхностного диаметра частиц есть возможность построить кривые зависимости отношения усреднённых факторов эффективности на двух длинах волн от среднего объёмно-

поверхностного диаметра (рис. 1). Средний объёмно-поверхностный диаметр частиц аэрозольных потоков определяется путём измерения оптической плотности исследуемого аэрозоля на нескольких длинах волн и вычисления усреднённых факторов эффективности ослабления для этих длин волн.

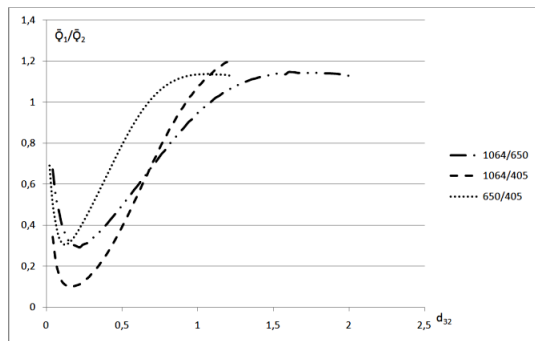


Рис. 1. Зависимость среднего объёмно-поверхностного диаметра от отношения усреднённых факторов эффективности на двух длинах волн

Отношение измеренных оптических плотностей на двух длинах волн равно отношению рассчитанных усреднённых факторов эффективности ослабления и выражает функцию среднего размера частиц [2]:

$$\frac{\tau_{\lambda_i}}{\tau_{\lambda_j}} = \frac{\overline{Q}(d, \lambda_i, m)}{\overline{Q}(d, \lambda_j, m)} = F_{ij}(d_{32}), \quad (1)$$

где λ – длина волны зондирующего излучения; Q – фактор эффективности ослабления для одиночных частиц; d – диаметр частиц и m – комплексный показатель преломления материала частиц. Исходя из формулы (1), рассчитанные кривые зависимости среднего объёмно-поверхностного диаметра частиц от отношения усреднённых факторов эффективности на двух длинах волн применимы для отношения оптических плотностей на двух длинах волн. Таким образом, измерение сигналов ослабления позволяет рассчитывать средний объёмно-поверхностный диаметр частиц.

Список литературы

1. Половченко С.В., Привалов В.Е., Чартий П.В., Шеманин В.Г. Восстановление функции распределения частиц по размерам на основе данных многоволнового лазерного зондирования // Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 5. С. 43-49.
2. Архипов В.А., Ахмадеев И.Р., Бондарчук С.С., Ворожцов Б.И., Павленко А.А., Потапов М.Г. Модифицированный метод спектральной прозрачности измерения дисперсности аэрозолей // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20. № 1. С. 48-52.

П.А. БЕЗРУКОВ¹, А.И. СИВАК¹, А.В. НАШЕКИН²,
А.И. СИДОРОВ^{1,3}, Н.В. НИКОНОРОВ¹

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

³ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КВАНТОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОНКИХ МЕДНЫХ И СЕРЕБРЯНЫХ НАНОПОРИСТЫХ СЛОЁВ, ПОЛУЧЕННЫХ РЕАКЦИЕЙ ЗАМЕЩЕНИЯ, ДЛЯ ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ВОДЫ

Показаны результаты определения квантовой эффективности функционирования тонких медных и серебряных нанопористых слоёв в качестве фотокатодов для расщепления воды под действием излучения в диапазоне длин волн 320 - 500 нм и приложенном постоянном напряжении 1 - 5 В. Квантовая эффективность тонких слоёв меди составила 0.25 %, а слоёв серебра – 0.75 %.

P.A. BEZRUKOV¹, A.V. NASHEKIN²,
A.I. SIVAK¹, A.I. SIDOROV^{1,3}, N.V. NIKONOROV¹

¹ITMO University, Saint-Petersburg

²Ioffe Institute of the RAS, Saint-Petersburg

³Saint-Petersburg State Electrotechnical University "LETI"

DETERMINATION OF THE QUANTUM EFFICIENCY OF THIN COPPER AND SILVER NANOPOROUS LAYERS, SYNTHESIZED BY SUBSTITUTIONAL REACTION FOR PHOTOCATALYTIC WATER SPLITTING

The quantum efficiency of thin nanoporous copper and silver films as a photocathodes for water splitting under an action of radiation (wavelength range 320 - 500 nm) and an applied constant voltage of 1 - 5 V has showed. The quantum efficiency of thin nanoporous copper films was 0.25 % and silver films – 0.75 %.

Фотокаталитическое разложение воды – один из перспективных экологических способов получения «зелёного» водорода с использованием энергии солнечного света, которое, по человеческим меркам, считается неисчерпаемым. Основным элементом фотокаталитической системы (ячейки) является фотокатод, эффективность работы которого, зависит не только от материала, но и от морфологии поверхности.

Целью работы является определение квантовой эффективности тонких нанопористых слоёв меди и серебра под действием излучения 320 - 500 нм и постоянным напряжением 1 - 5 В.

Тонкие нанопористые слои меди и серебра синтезированы с помощью реакции замещения на подложках из железа, покрытых тонким слоем олова, и меди из водных растворов сульфата меди (5 г CuSO_4 / 100 мл H_2O) и нитрата серебра (3.75 г AgNO_3 / 100 мл H_2O). Синтезированные нанопористые слои состоят из многоугольных пластин с размерами до 3 мкм, дендридообразных наростов размерами до 2 мкм, из которых выходят наноразмерные дендриты до 20 нм (рис. 1). Определение квантовой эффективности фотокаталитического разложения воды полученных тонких нанопористых медных и серебряных плёнок осуществлялось за счёт фиксации изменения фототока (рис. 2 и 3) в момент начала облучения светом с длиной волны в диапазоне 320 - 500 нм при постоянном напряжении, по формуле:

$$\eta = \frac{I_{\phi} \cdot \hbar \omega}{e P_{\text{полг.}}}$$

где I_{ϕ} – фототок, А; $P_{\text{полг.}}$ – поглощённая мощность излучения, Вт.

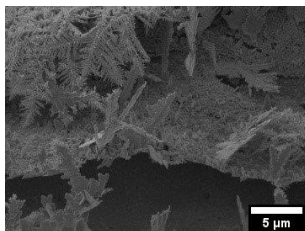


Рис. 1. СЭМ-изображение тонкой плёнки серебра

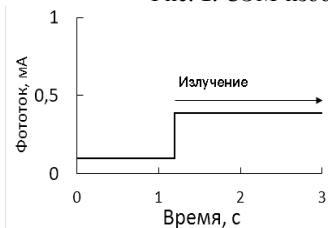


Рис. 2. Осциллограмма фототока в момент начала облучения

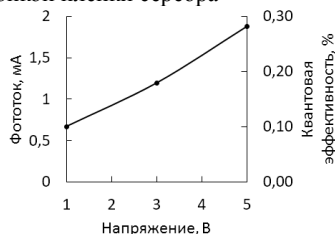


Рис. 3. Зависимость фототока и квантовой эффективности от напряжения

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00559).

А.В. ВЛАСОВ, Н.Р. ЗАПОТЫЛКО, А.А. КАТКОВ

Научно-исследовательский институт «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха, Москва

СРАВНЕНИЕ СИТАЛЛА СО-115М ВАРОК 1990-х И 2017-2021 ГОДОВ ДЛЯ ЛАЗЕРНЫХ ГИРОСКОПОВ

Приведены сравнительные результаты температурных зависимостей относительного удлинения ($\Delta l/l_0$) образцов из ситалла СО-115М, произведённого на Лыткаринском заводе оптического стекла (ЛЗОС) в разное время: в 1990-х годах («старые» варки) и в настоящее время («новые» варки). Диапазон температур: от минус 60 до 90 °С. Показано, что при правильном выборе начальной величины управляющего напряжения предустановки в зависимости от температуры включения датчика лазерного гироскопа (ЛГ) пьезокорректоры (ПК) в случае использования ситалла «новых» варок обеспечат работу малогабаритного датчика угловой скорости в одномодовом режиме без переключения во всём требуемом температурном интервале.

A.V. VLASOV, N.R. ZAPOTYLKO, A.A. KATKOV

POLYUS Research Institute of M.F. Stelmakh Joint Stock Company, Moscow

COMPARISON OF THE SITALL CO-115M PRODUCED INTO 1990-s AND 2017-2021 FOR LASER GYROSCOPES

Comparative results of temperature dependences of the relative elongation ($\Delta l/l_0$) of samples from the CO-115M sitall produced at the Lytkarinsky Optical Glass Plant (LZOS) at different times: in the 1990s ("old" brews) and now ("new" brews) are presented. Temperature range: from minus 60 to 90 °C. It is shown that with the correct choice of the initial value of the control voltage of the preset, depending on the switching temperature of the laser gyroscope sensor, piezocorrectors, in the case of using the "new" brews, will ensure the operation of the small-sized angular velocity sensor in single-mode mode without switching over the entire required temperature range.

Для проведения сравнительных dilatометрических исследований ситалла СО-115М варок 90-х годов и последних четырёх лет (после модернизации технологии и введения автоматизированного контроля технологических параметров при варке) были изготовлены стандартные образцы (по 8 и 21 штук, соответственно): цилиндры диаметрами 4 мм (для «старых» варок) и 6 мм (для «новых» варок) и длиной 25 мм. Контроль $\Delta l/l_0$ проводился на следующем оборудовании:

- образцы из «старых» варок – с использованием горизонтального дилатометра DIL 402C в АО «ВИАМ»;

- образцы из «новых» варок – с использованием термомеханического анализатора ТМА НЗ Hyperion в АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха».

Измерения проводились по следующему режиму: охлаждение образца до минус 70 °С со скоростью 5°С/мин, выдержка при данной температуре в течение 15 минут, нагрев до 105 °С со скоростью 3°С/мин [1]. Полученные температурные зависимости относительного удлинения ситалла СО-115М «старых» и «новых» варок представлены на рис. 1.

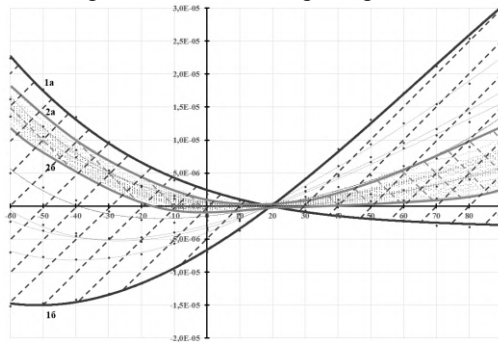


Рис. 1. Температурные зависимости d/l ситалла СО-115М различных варок:

1а, 1б – диапазон значений d/l ситалла «старых» варок;

2а, 2б – диапазон значений d/l ситалла «новых» варок

Как видно из рис. 1, диапазон значений d/l ситалла «новых» варок примерно в три раза уже, чем диапазон значений d/l ситалла «старых» варок. При использовании ситалла «новых» варок с максимальным $\Delta L_{\max}$ изменение оптического периметра резонатора ЛГ с $L = 16$ см составит 2,63 мкм, что соответствует изменению периметра $\sim$ на 4λ ($\lambda = 0,63$ мкм), а при использовании ситалла «старых» варок – $\Delta L_{\max} = 7,22$ мкм, что соответствует изменению периметра $\sim$ на 12λ .

Система регулировки периметра (СРП) может скомпенсировать изменение длины оптического периметра на 4λ без перехода на другую моду. При использовании ситалла СО-115М «новых» варок СРП при правильном выборе начального напряжения обеспечит работу ЛГ в одномодовом режиме во всём диапазоне рабочих температур прибора.

Список литературы

1. Власов А.В., Запотьлько Н.Р., Катков А.А. Дилатометрические измерения в лазерной гироскопии // Сборник докладов конференции «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике». М.: МИРЭА, 2018. С. 215-219.

А.И. ЯКУШЕВ, Н.Р. ЗАПОТЫЛКО, А.А. КАТКОВ,
А.Ю. КАЗАНЦЕВА

Научно-исследовательский институт «Полус» им. М.Ф. Стельмаха, Москва

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИПОЕВ ПОВЫШЕННОЙ ЖЁСТКОСТИ В ПЬЕЗОКОРРЕКТОРАХ ЛАЗЕРНЫХ ГИРОСКОПОВ

Приведены сравнительные результаты исследований параметров датчиков лазерных гироскопов с пьезокорректорами, в составе которых используются припои повышенной жёсткости ПСр-2 ($T_{пл.} = 235\text{ }^{\circ}\text{C}$) и ПСр-2,5 ($T_{пл.} = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$) по сравнению с припоем ПОС-61 ($T_{пл.} = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$), в широком интервале температурных воздействий и изменения напряжения подстройки пьезокорректоров после переключения на ортогональную моду, наблюдаемые на повышенных температурах.

A.I. YAKUSHEV, N.R. ZAPOTYLKO, A.A. KATKOV,
A.Yu. KAZANTSEVA

POLYUS Research Institute of M.F. Stelmakh Joint Stock Company, Moscow

THE USE OF SOLDERS OF INCREASED RIGIDITY IN PIEZOCORRECTORS OF LASER GYROSCOPES

Comparative results of studies of the parameters of sensors of laser gyroscopes with piezocorrectors (PC), which use solders of increased rigidity ПСр-2 ($T_m = 235\text{ }^{\circ}\text{C}$) and ПСр-2,5 ($T_m = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$), are presented compared with solder ПОС-61 ($T_m = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$), in a wide range of temperature influences and changes in the voltage of the piezocorrectors adjustment after switching to the orthogonal mode, observed at elevated temperatures.

В некоторых серийно выпускаемых в НИИ «Полус» малогабаритных датчиках угловой скорости наблюдаются следующие нежелательные явления, снижающие точность лазерных гироскопов (ЛГ):

- невоспроизводимость изменения напряжения на пьезокорректорax (ПК) при температурных воздействиях;

- «скачки» изменения напряжения подстройки периметра после переключения на другую ортогональную моду при повышенной температуре [1].

Было высказано предположение, что вышеуказанные явления возникают вследствие использования в соединении «блок

пьезоэлектрический (БП) + пьезозеркало» низкотемпературных «мягких» припоев типа ПОС-61 ($t_{\text{пл.}} = 180^\circ\text{C}$) [2].

Представленная работа направлена на исследование влияния более жёстких припоев (ПСр-2, $t_{\text{пл.}} = 235^\circ\text{C}$ и ПСр-2,5, $t_{\text{пл.}} = 300^\circ\text{C}$) в вышеуказанном соединении на работу ЛГ.

Датчики с использованием различных марок припоя были испытаны в режиме реверса мод с различной длительностью непрерывной работы на воздействие пониженной (минус 55°C) и повышенной ($+75^\circ\text{C}$) температуры. Напряжения на ПК находились в среднем положении в диапазоне от -70 до -110 В. После каждого съёма информации при испытаниях в климатических условиях проводилось измерение напряжения на ПК от 0 до -200 В. Получены:

- воспроизводимости коэффициента передачи ПК ΔU_λ для перестройки на одну длины волны датчика в одинаковых условиях внешней среды: ΔU_λ для всех датчиков удовлетворяют требованиям работы в составе датчиков ЛГ и примерно одинаковые;

- изменения напряжения на ПК за время непрерывной работы $\Delta U_{\text{ПК}}$: скорость изменения напряжения после переключения на ортогональную моду для всех датчиков примерно одинакова и не зависит от типа припоя.

Проведены испытания датчиков в НКУ длительностью 60 минут при подаче напряжений 10 - 40 и 140 - 185 В с последующим измерением гистерезиса, в результате которых выявлено, что существенных различий в изменении величины гистерезиса для всех датчиков не наблюдается, что свидетельствует об отсутствии отрыва блока пьезоэлектрического от пьезозеркала при работе датчика.

Измерения времени установления выходного сигнала ФПУ периметра при перестройке ПК на другую моду показали, что исследованные типы припоев не влияют на скорость переключения ПК. Время установления выходного сигнала ФПУ при перестройке ПК на соседнюю моду для всех исследованных датчиков не превышает 2,5 мс.

Список литературы

1. Голяев Ю.Д., Запотьилько Н.Р., Недзвецкая А.А., Синельников А.О., Тихменев Н.В. Лазерные гироскопы с увеличенным временем непрерывной работы // Датчики и системы. 2011. № 11 (150). С. 49-51.
2. Запотьилько Н.Р., Катков А.А., Недзвецкая А.А. Пьезокорректор для компенсации тепловых вариаций длины оптического пути резонатора лазерного гироскопа // Оптический журнал. 2011. Т. 78. № 10. С. 10-12.

В.В. ДЬЯЧЕНКО, В.Е. ПРИВАЛОВ¹, В.Г. ШЕМАНИН

Новороссийский политехнический институт (филиал) КубГТУ

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИДАРНОГО УРАВНЕНИЯ ДЛЯ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА МОЛЕКУЛАМИ КАРБОНОВОГО ЦИКЛА В АТМОСФЕРЕ

Выполнено компьютерное моделирование лидарного уравнения для измерения концентрации молекул карбонового цикла лидаром комбинационного рассеяния света в атмосфере на расстоянии до 100 м. Показано, что при зондировании таким лидаром всех исследованных молекул на длине волны лазерного излучения 405 нм можно зарегистрировать за время измерения от 2,6 мкс до 125,6 с.

V.V. DYACHENKO, V.E. PRIVALOV¹, V.G. SHEMANIN

Novorossiysk Polytechnic Institute of Kuban State Polytechnic University

¹Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

COMPUTER SIMULATION OF THE LIDAR EQUATION FOR THE RAMAN SCATTERING BY CARBON CYCLE MOLECULES IN THE ATMOSPHERE

A computer simulation of the lidar equation was carried out to measure the concentration of carbon cycle molecules by the Raman lidar in the atmosphere at ranging distances of up to 100 m. It is shown that when such a lidar senses all the studied molecules in the atmosphere at the 405 nm laser radiation wavelength, it is possible to register during the measurement time from 2.6 μ s to 125.6 s.

Изменение климата связывают с усилением парникового эффекта, вследствие повышения в атмосфере концентраций молекул «карбонового цикла». Контроль их эмиссии – чрезвычайно важная экологическая и экономическая задача. Средневзвешенная оценка роли основных КАГ без паров воды, базирующаяся на их концентрациях в атмосфере и на потенциале [1] следующая: углекислый газ – 50 %, хлорфторуглероды – 20 %, метан – 16 %, тропосферный озон – 8 %, окись азота – 6 %. Многие из этих молекул выделяются в атмосферу при использовании различных технологий и в животноводстве, а их природное выделение усиливается техногенезом [2].

Одним из методов мониторинга КАГ могут быть лазерные системы. Исследования [3 - 7] свидетельствуют, что для дистанционного измерения

концентрации молекул на уровне десятков ПДК целесообразен лидар комбинационного рассеяния света. Нам же необходимо определять значительно более низкие концентрации для чего было выполнено компьютерное моделирование лазерного излучения на волнах 355, 405 и 532 нм с частотой следования лазерных импульсов 1 кГц, энергии в импульсе 1 мДж и диапазона расстояния зондирования от 10 до 100 м, полагая, что геометрический фактор лидара $G(z)$ в нашем случае 1.

Проведённые экспериментальные исследования и результаты компьютерного моделирования позволяют сделать следующие выводы.

1. Существует возможность выбора оптимальных параметров лазера для лидара комбинационного рассеяния света с целью одновременного зондирования в атмосфере всех молекул карбонового цикла.

2. Все компоненты можно уверенно определять на расстоянии до 40 м. При увеличении расстояния зондирования до 100 м, диапазон времени измерений становится очень широким: от 272 мкс до 125,6 с, что усложняет одновременную запись спектров всех молекул. Для преодоления этой проблемы необходимо менять время измерения лидарных сигналов, что доказано экспериментами [3, 4, 8].

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты № 19-42-230004 и № 19-45-230009.

Список литературы

1. Дьяченко В.В., Дьяченко Л.Г., Девисилов В.А. Науки о земле. М.:НИЦ ИНФРА-М, 2019.
2. Воробьев А.Е., Дьяченко В.В., Вильчинская О.В., Корчагина А.В. Основы природопользования: экологические, экономические и правовые аспекты. Ростов-на-Дону: Изд-во Феникс, 2007.
3. Привалов В.Е., Фотиади А.Э., Шеманин В.Г. Лазеры и экологический мониторинг атмосферы. СПб.: Лань, 2013.
4. Privalov V.E., Shemanin V.G. Hydrogen sulfide molecules lidar sensing in the atmosphere // Optical Memory and Neural Networks. 2018. P. 120-131.
5. Privalov V.E., Shemanin V.G. Accuracy of lidar measurements of the concentration of hydrofluoride molecules in the atmospheric boundary layer // Measurement Techniques. 2020. V. 63. No. 7. P. 543-548.
6. Привалов В.Е., Шеманин В.Г. Параметры лидаров для дистанционного зондирования газовых молекул и аэрозоля в атмосфере. СПб.: БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2001.
7. Зуев В.Е., Зуев В.В. Дистанционное зондирование атмосферы. СПб, 1992.
8. Dyachenko V.V., Charti P.V., Shemanin V.G. Laser systems for the pollutants control in the oil and gas industry // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 272. P. 032003.

К.С. АНДРЕЙЧИКОВ, В.П. АСТАХОВ,
Г.С. СОЛОВЬЕВА, Г.В. ЧЕКАНОВА
АО «Московский завод «Сапфир», Москва

СТОЙКИЙ К КОРОТКОВОЛНОВОМУ ОБЛУЧЕНИЮ ПЛАНАРНЫЙ ФОТОДИОДНЫЙ КРИСТАЛЛ ИЗ АНТИМОНИДА ИНДИЯ

В работе произведена экспериментальная оценка стойкости планарных фотодиодных кристаллов (ФДК) из антимонида индия к коротковолновому облучению при различных вариантах конструкции контактной системы ФДК.

K.S. ANDREICHIKOV, V.P. ASTAKHOV,
G.S. SOLOVIOVA, G.V. CHEKANOVA
JSC «Moscow plant «SAPHIR», Moscow

RESISTANT TO SHORTWAVE IRRADIATION PLANAR INDIUM ANTIMONIDE PHOTODIODE CRYSTAL

In this work was carried out experimental assessment of indium antimonide planar photodiode crystals resistance (PDC) to shortwave irradiation for various design options of the contact system PDC.

Как правило, все виды фотодиодных кристаллов из антимонида индия, выпускаемые производством, являются нестойкими к коротковолновому ($\lambda \leq 1$ мкм) облучению. Это означает, что при попадании любых, даже «слабых» пучков такого излучения на охлаждённый ФДК происходит деградация его вольт-амперной характеристики, а следовательно и его пороговых параметров, со скоростью, пропорциональной плотности потока излучения результаты деградации сохраняются на все время охлаждения при работе ФДК, а в ряде случаев и после термализации и прогревов. Обычно стойкость фотодиодов из антимонида индия к коротковолновому облучению обеспечивается установкой спектроразделительного фильтра перед ФДК при сборке фотодиода.

В тоже время целесообразно обеспечить такую стойкость самого ФДК, поскольку в процессе сборки и промежуточных проверок он может подвергнуться неконтролируемым коротковолновым облучениям (например, от лампы накаливания), способным привести к деградации его параметров. При этом появляется также возможность минимизировать весогабаритные параметры фотодиода. В соответствии с данными [1]

представленный эффект объясняется тем, что облучение охлаждённого ФДК приводит к зарядке всех открытых для облучения участков его планарной структуры электронами, «выброшенными» на поверхность. Следствием такой зарядки поверхности является формирование «наведённого» канала $p(p^+)$ -типа у поверхности ФДК. Если такой канал образуется между p^+ фоточувствительной площадкой и дополнительным («охранным») короткозамкнутым кольцом p^+ -типа вокруг площадки, являющимся обязательным элементом топологии ФДК, то происходит замыкание площадки на «охранное» кольцо, определяющее деградацию. Предотвратить деградацию можно создав светозащитные экраны между площадкой и кольцом, входящие в состав контактной системы ФДК.

В работе произведена экспериментальная оценка стойкости планарных многоплощадочных фотодиодных кристаллов к коротковолновому облучению при различных вариантах конструкции их контактной системы. Показано, что стойкими при охлаждении являются кристаллы, у которых контактная система имеет в своём составе светонепроницаемые экраны в виде рамок вокруг каждой площадки. Рамки совмещены с соответствующими токоведущими дорожками, а ширина рамок определяется условием перекрытия ими ОПЗ площадки, а также длины экранирования Дебая в базе. Только при таком варианте контактной системы, в случае охлаждения кристалла, прекращение облучения, независимо от его интенсивности, синхронно возвращает ВАХ площадки к исходному (до облучения) виду благодаря отсутствию каналов $p(p^+)$ -типа на участках поверхности базы между площадкой и «охранным» кольцом p^+ -типа, закрытых от облучения экранами. На рис. 1 представлен пример исполнения подобной контактной системы.

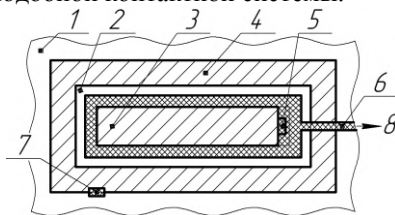


Рис. 1. Вариант контактной системы с экранами коротковолнового излучения: 1 – фрагмент пластины (n -тип); 2 – база (n -тип); 3 – площадка (p^+ -тип); 4 – охранное кольцо (p^+ -тип); 5 – контактное окно площадки; 6 – токоведущая дорожка; 7 – закоротка охранного кольца; 8 – контактная площадка на периферии ФДК

Список литературы

1. Астахов В.П., Гиндин П.Д., Чеканова Г.В. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 2. С. 131-140.

К.С. АНДРЕЙЧИКОВ, В.П. АСТАХОВ,
Д.Э. ФАЗИЛОВ, И.Э. ФАЗИЛОВА, В.И. ШАЕВИЧ
АО «Московский завод «Сапфир», Москва

ОСОБЕННОСТИ СТОЙКОСТИ ПЛАНАРНЫХ ФОТОДИОДОВ ИЗ АНТИМОНИДА ИНДИЯ К СТАТИЧЕСКОМУ ЭЛЕКТРИЧЕСТВУ

Представлены данные по влиянию статического электричества на шумовой ток планарных многоплощадочных фотодиодов из антимонида индия.

K.S. ANDREICHKOV, V.P. ASTAKHOV,
D.E. FAZILOV, I.E. FAZILOVA, V.I. SHAEVICH
JSC «Moscow plant «SAPHIR», Moscow

RESISTANCE TO STATIC ELECTRICITY FEATURES OF PLANAR INDIUM ANTIMONIDE PHOTODIODES

Results of static electricity influence on noise-current of multi-site indium antimonide photodiodes are presented.

До настоящего времени отсутствуют данные по влиянию статического электричества на стойкость планарных фотодиодов (ФД) из антимонида индия.

В работе изучали влияние статического электричества по ОСТ 11073.062-2001 (Приложение Б) на шумовые токи ($I_{ш}$) планарных 13-площадочных фотодиодов p^+-n типа из антимонида индия с размером площадок 60 x 350 мкм. Испытания проводили с охлаждением (77 К) и без охлаждения на ФД разной степени годности по числу бездефектных площадок по индивидуальной программе. При этом производили разрядку конденсатора ёмкостью 200 пФ, заряжавшегося последовательно до напряжения (50 ÷ 300) В противоположных полярностей («плюс» или «минус» на p^+ -эмиттере), через каждую площадку в произвольных последовательностях с числом испытаний ~ 50 на каждой площадке. Основные результаты этих экспериментов сводятся к следующему.

1. Неохлаждённые ФД любой степени годности по числу площадок с $I_{ш} < N$ являются стойкими к статическому электричеству до потенциала не менее 300 В обеих полярностей (степень жёсткости между III и IV, а возможно и больше по ОСТ 11073.062-2001).

2. При охлаждении, стойкими с не меньшей степенью жёсткости являются ФД, не имеющие дефектных площадок (с $I_{ш} > N$), проявляющихся в процессе производства и испытаний ФД. Такие ФД являются также стойкими к длительному (более 50 часов) прогреву при $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3. Наличие дефектных площадок у исходных ФД свидетельствует о высокой вероятности появления новых дефектных площадок ($I_{ш} > N$) при воздействии как статического электричества различных вариантов воздействия, так и прогрева.

4. Совокупность экспериментальных данных свидетельствует о том, что увеличение степени дефектности отдельных площадок (а реже – и её уменьшение) при воздействии статического электричества на охлаждённый ФД носит накопительный характер и может объясняться накоплением избыточных зарядов того или иного знака, генерируемых на поверхности базы у границы с эмиттером при каждом воздействии

В.И. ПАВЛОВ^{1,2}, Н.П. ХАТЫРЕВ¹, Н.М. КОНДРАТЬЕВ

¹*Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических
и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская обл.*

²*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

³*Российский квантовый центр, Сколково*

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРОВ СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ МИКРОРЕЗОНАТОРАМИ ДЛЯ СИСТЕМЫ ЛАЗЕРНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ РУБИДИЕВОГО ФОНТАНА

Сверхстабильные лазеры высокой спектральной чистоты являются технологической основой для атомных стандартов частоты фонтанного типа. Для этих целей используются лазеры с шириной линии порядка 1 кГц на длине волны 1560 нм. Возможным способом создания таких лазеров является затягивание с использованием оптических микрорезонаторов.

V.I. PAVLOV^{1,2}, N.P. KHATYREV¹, N.M. KONDRATIEV³

¹*Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering,
Mendeleevo, Moscow region*

²*Lomonosov Moscow State University*

³*Russian Quantum Center, Skolkovo*

APPLICATION OF THE SELF-INJECTION LOCKED DIODE LASERS FOR A LASER COOLING SYSTEM OF A RUBIDIUM FOUNTAIN

Ultra-stable lasers of high spectral purity are the technological basis for photon-type atomic frequency standards. For these purposes, lasers with a line width of about 1 kHz at a wavelength of 1560 nm are used. A possible way to create such lasers is pulling on using optical microresonators.

В системе лазерного охлаждения рубидиевого фонтана обычно используются лазеры на длине волны 1560 нм, которые после удвоения частоты привязываются к рубидиевой ячейке. Следовательно, существует явная потребность в надёжных миниатюрных лазерах на длине волны 1560 нм с малой шириной линии. Оптические резонаторы с модами «шепчущей галереи» позволяют создавать на их основе узкополосные микролазеры с использованием метода затягивания [1]. Но они ещё не достигли стабильности, определяемой их фундаментальным шумом. В данной работе проведены расчёты шумовых характеристик лазеров, стабилизированных микрорезонаторами с модами шепчущей галереи, и

сделаны оценки ширины линии, обусловленной терморефрактивным, термоупругим, фотоупругим и броуновским шумом. Мы также рассчитали общий шум в волноводе и получили оценку ширины линии 0,5 кГц при времени усреднения 1 с. Было экспериментально показано уменьшение ширины линии более чем в 1000 раз с помощью эффекта затягивания. Однако есть вопросы о пределах такой стабилизации. В работе [1] показано, что флуктуации частоты лазерного диода зависят от флуктуаций оптического пути лазерного луча в элементах связи.

В данной работе терморефрактивные, термоупругие, фотоупругие и броуновские шумы в элементах связи в микрорезонаторах были рассчитаны с использованием флуктуационно-диссипативной теоремы и метода конечных элементов [2]. Моделирование проводилось для волновода из нитрида кремния 0,8 x 0,8 мкм длиной 20 мм на длине волны 1560 нм (рис. 1 и 2). Установлено, что для интегрального волновода предел ширины линии, обусловленный тепловым шумом оптического элемента связи, находится на уровне 0,5 кГц при времени усреднения $T = 1$ с. На основании моделирования был сделан вывод, что экспериментальные результаты, полученные, например, в исследовании [3] 1 кГц, ограничены техническими флуктуационными процессами. В результате работы можно сделать вывод, что диодные лазеры, стабилизированные микрорезонаторами методом затягивания, могут быть применимы для системы лазерного охлаждения рубидиевого фонтана.

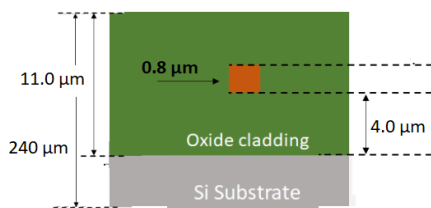


Рис. 1. Схема волновода, используемого при моделировании

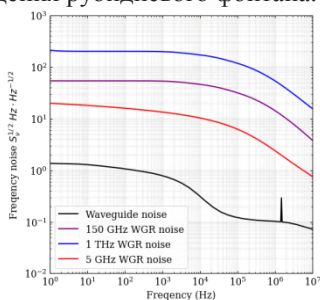


Рис. 2. Частотный шум в резонаторе и элементе связи

Список литературы

1. Kondratiev N.M. Self-injection locking of a laser diode to a high-Q WGM microresonator // Optics Express. 2017. V. 25. No. 23. P. 28167-28178.
2. Kondratiev N.M. Thermorefractive noise in whispering gallery mode microresonators: analytical results and numerical simulation // Physics Letters. 2018. V. 382. No. 33. P. 2265-2268.
3. Pavlov N.G. Narrow-linewidth lasing and soliton Kerr microcombs with ordinary laser diodes // Nature Photonics. 2018. V. 12. No. 11. P. 694-698.

В.А. ШКУРАТОВА, Г.К. КОСТЮК, А.А. ПЕТРОВ

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЯЮЩИЕ ФАЗОВЫЕ МАСКИ ДЛЯ ОЧЕРТАНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ

В работе представлены фазовые маски, изготовленные из двулучепреломляющих кристаллических пластин CaCO_3 с применением технологии структурирования оптически прозрачных материалов лазерно-индуцированной микроплазмой, для создания очертания лазерных пучков заданной формы в схеме построения изображения с распределением интенсивности по сечению пучка, близким к распределению с плоской вершиной.

V.A. SHKURATOVA, G.K. KOSTYUK, A.A. PETROV

ITMO University, Saint-Petersburg

BIREFRINGENT PHASE MASKS FOR LASER BEAM SHAPING

The paper presents phase masks, fabricated on birefringent CaCO_3 crystal plates by the technology of processing optically transparent materials by laser-induced microplasma, to create laser beams with given shapes and intensity distributions close to flat-top distributions at imaging plane.

В последние годы созданию точного очертания лазерных пучков заданной формы с преимущественно плоской вершиной распределения интенсивности в пределах очертания уделяется значительное внимание [1 - 4]. Методы создания очертания лазерного пучка принято разделять на две основные группы: формирование очертаний в фокальной плоскости [1, 2] или в плоскости изображения [3, 4]. Для реализации этих методов в основном применяются пространственные модуляторы света [1 - 4]. В настоящий момент большее внимание уделяется применению методов второй группы, так как точность очертания пучков методами первой группы не идеальна из-за сложной природы дифракции света.

В настоящей работе для преобразования распределения интенсивности по сечению лазерных пучков мы предлагаем использовать фазовые маски (ФМ) из двулучепреломляющих пластин с кристаллической осью, ориентированной параллельно поверхности пластин, в схеме построения изображения. ФМ могут быть выполнены травлением областей любой формы, задающей очертание пучка, на заданную глубину, обеспечивающую фазовый сдвиг π или 2π в зависимости от толщины исходной пластины ($h_0 \sim \lambda$ или $\lambda/2$). При установке таких ФМ между

линейным поляризатором (П) с азимутом пропускания, направленным под углом 45° по отношению к направлению главных осей кристаллической пластины, и анализатором (А), азимут пропускания которого может быть ориентирован как перпендикулярно, так и параллельно азимуту пропускания П, в зависимости от толщины исходной пластины, очертание формы вытравленной области преобразуется в распределение интенсивности на выходе А, в дальнейшем проецируемое с уменьшением объективом высокого качества в плоскость изображения.

На рис. 1 (колонка 1) представлены оптические конфигурации ФМ, изготовленных нами по технологии структурирования оптически прозрачных материалов лазерно-индуцированной микроплазмой [5] на пластинах CaCO_3 с толщиной 1.017 ± 0.006 мкм ($h_0 \sim \lambda$) для первой ФМ и толщиной 1.020 ± 0.006 мкм ($h_0 \sim \lambda/2$) для второй ФМ. Для подтверждения работоспособности ФМ были протестированы в лазерной установке с наносекундным Nd:YAG лазером (длина волны $\lambda = 1.06$ мкм). Формируемые с их применением распределения интенсивности были зарегистрированы с использованием ПЗС-камеры (рис. 1, колонки 2 и 3). Также методом лазерной абляции на листах полированной стали были получены отпечатки, соответствующие по форме конфигурациям зарегистрированных распределений интенсивности (рис. 1, колонка 4).

Работа поддержана Российским научным фондом, проект № 20-71-10103.

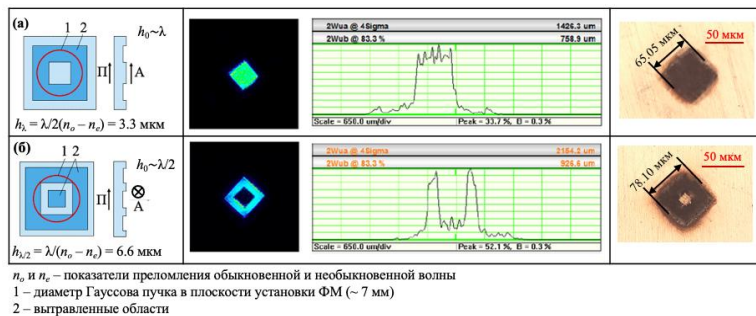


Рис. 1. Оптические конфигурации и результаты тестирования ФМ, изготовленных: на пластине с толщиной $h_0 \sim \lambda$ (a); на пластине толщиной $h_0 \sim \lambda/2$ (б)

Список литературы

1. Sanner N., Huot N., et. al. // Opt. Lasers Eng. 2007. V. 45. P. 737-741.
2. Sanner N., Huot N., et. al. // Opt. Lett. 2005. V. 30. P. 1479-1481.
3. Kuang Z., Li J., et. al. // Opt. Lasers Eng. 2015. V. 70. P. 1-5.
4. Li J., Kuang Z., et. al. // Appl. Opt. 2016. P. 1095-1100.
5. Shkuratova V., Rymkevich V., et. al. // J. Laser Micro Nanoeng. 2018. V. 13. P. 211-215.

С.В. ГАВРИШ, С.Г. КИРЕЕВ, Д.Ю. ПУГАЧЕВ,
С.Г. ШАШКОВСКИЙ

ООО «НПП «Мелитта», Москва

ВЛИЯНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ КСЕНОНОВОЙ ПЛАЗМЫ НА ОПТИЧЕСКОЕ ПРОПУСКАНИЕ КВАРЦЕВЫХ ОБОЛОЧЕК ИМПУЛЬСНЫХ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ЛАМП

В работе показано, что в течение срока службы импульсной лампы при прохождении УФ-излучения плазмы в легированной титаном кварцевой оболочке происходит сдвиг коротковолновой границы пропускания до 220 - 230 нм, а в нелегированном стекле наблюдается падение на 5 % коэффициента пропускания в диапазоне 240 - 300 нм, а далее происходит просветление прозрачности кварца.

S.V. GAVRISH, D.Ju. PUGACHEV, S.G. KIREEV,
S.G. SHASHKOVSKIY

Scientific and Production Enterprise "Melitta", Moscow

XENON PLASMA RADIATION INFLUENCE ON THE OPTICAL TRANSMISSION OF FLASH LAMPS' QUARTZ SHELLS

It is shown that during the life of a flash lamp, when UV radiation from a plasma passes through a titanium-doped quartz shell, the short-wavelength transmission limit shifts to 220 - 230 nm. Undoped quartz shows a 5 % drop in transmission in the range 240 - 300 nm, and then the transmission of quartz increases.

В настоящее время импульсные ксеноновые лампы нашли широкое применение в качестве высокоинтенсивных источников УФ-излучения в спектральном диапазоне 200 - 300 нм для систем обеззараживания воздуха. Известно [1], что срок службы и эффективность газоразрядного источника определяется оптическим пропусканием оболочки, ограничивающей плазменный канал в рабочем спектральном диапазоне излучения лампы. Целью наших исследований является проведение сравнительных исследований оптической прозрачности кварцевой оболочки, изготовленной из легированного и нелегированного кварцевого стекла, под воздействием УФ-излучения в течение срока службы импульсной лампы. В качестве исследуемых образцов нами использовались кварцевые прозрачные трубы марки QCT (ТУ 5932-002-62176241-2012) и трубы марки PN215 с примесью титана до 1,5 вес. % и содержанием ОН-группы 15 - 45 ppm. При исследовании кварцевых труб

внутри них по оси размещались импульсные источники УФ-излучения. Такая система энергетического облучения за счёт наличия между лампой и исследуемой трубкой воздушной прослойки позволяла исключить высокотемпературное воздействие плазмы теплопроводностью, приводящее к термическому восстановлению центров окраски.

Полученные результаты приведены на рис. 1. Для выявления происходящей в кварцевой стенке оптической деградации перед началом испытаний от исследуемой трубы отрезался образец – свидетель, у которого изучалось оптическое пропускание (кривые 1), а затем оставшая часть подвергалась воздействию импульсного УФ-излучения в течение 66,0 млн вспышек (рис. 1а) и 166 тыс. импульсов (рис. 1б), затем замеры повторялись (кривые 2).

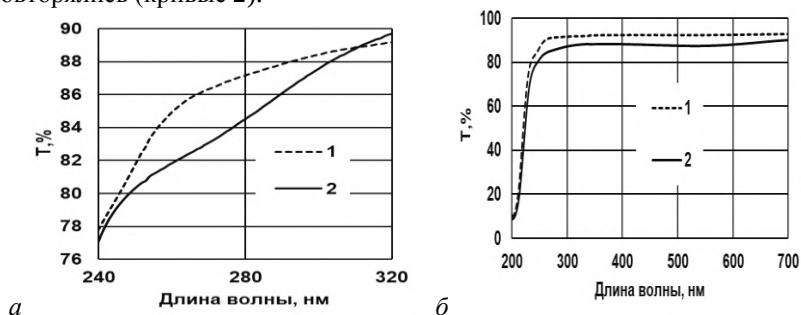


Рис. 1. Оптическое пропускание оболочек импульсных источников УФ-излучения из нелегированного (а) и легированного титаном (б) кварцевых стёкол до (1) и после (2) воздействия излучения ксеноновой плазмы

Нами установлено:

- наличие примеси титана приводит к сдвигу коротковолновой границы пропускания до 220 - 230 нм (рис. 1б), чего не происходит в случае нелегированного стекла (на рис. 1а не показано) [1];
- при воздействии УФ-излучения на нелегированное стекло происходит снижение оптической прозрачности в области 240 - 300 нм, но при этом происходит просветление при длинах волн свыше 300 нм;
- для легированного кварца свойственно падение пропускания во всём исследуемом спектральном диапазоне, что связано с процессами в электронно-ионной подсистеме сетки стекла (с дефектностью), определяющей уровень нерелаксирующего поглощения [1].

Список литературы

1. Климашина Е.В., Чистосердов В.Г. Влияние малых добавок некоторых элементов на спектральные свойства кварцевого стекла // Физика и химия стекла. 1975. Т. 1. № 2. С. 162-165.

В.И. ПАВЛОВ^{1,2}, Н.П. ХАТЫРЕВ¹

¹*Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических
и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская обл.*

²*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ АППАРАТУРЫ ДЛЯ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКИХ ЧАСТОТНЫХ ГРЕБЕНОК

Современные подходы обеспечивают непрерывный мониторинг в местах расположения датчиков. Однако, существует потребность в мониторинге выбросов различных газов на крупномасштабных участках Земной поверхности в реальном времени, поскольку источники могут быть нестационарными и пространственно изменчивыми. Перспективным является применение методов дистанционного зондирования Земли с использованием устройств на основе оптических частотных гребенок.

V.I. PAVLOV^{1,2}, N.P. KHATYREV¹

¹*Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering,
Mendeleevo, Moscow region*

²*Lomonosov Moscow State University*

PROSPECTS FOR CREATION OF EQUIPMENT FOR SATELLITE MONITORING OF GREENHOUSE GASES BASED ON OPTICAL FREQUENCY COMBS

Modern approaches provide continuous monitoring at sensor locations. However, there is a need to monitor emissions of various gases on large-scale areas of the Earth's surface in real time, since sources can be non-stationary and spatially variable. The application of Earth remote sensing methods using devices based on optical frequency combs is promising.

Выбросы парниковых газов и загрязнителей представляют серьезную опасность для глобального изменения климата, а также здоровья и безопасности человека. Таким образом, задача обнаружение и количественной оценки следов газов является критически важной потребностью для множества приложений, включая мониторинг и обнаружение выбросов газов в городских и промышленных условиях [1]. Также, для многих задач недостаточно наблюдение локальных и стационарных во времени потоков. Например, данные, полученные с помощью точечных датчиков с самолетов, спутников или установленных

на транспортных средствах оценок выбросов от нефтегазовых операций, могут пропустить самые большие потоки, которые считаются очень редкими. Непрерывный мониторинг может быть достигнут с помощью сетей точечных датчиков, но уровень детализации в разбивке по местоположению и размерами источников обязательно должен масштабироваться с количеством развернутых датчиков, что увеличивает стоимость и сложность.

Открытие оптических частотных гребенок было удостоено Нобелевской премии и существенно повлияло на область молекулярной спектроскопии [2, 3]. Фемтосекундный импульсный выход гребенчатого лазера с синхронизацией мод состоит из тысяч идеально разнесённых элементов с дискретной длиной волны, которые действуют как параллельный набор непрерывных лазеров с известными частотами [4 - 6]. Для бортовой работы спектрометра на основе двойных гребенок (рис. 1) потребовалось несколько технологических усовершенствований. Частотные гребенки, полученные с помощью фемтосекундного лазера очень сложны в своей настройке. Поэтому им на замену пришли частотные гребенки, генерируемые в микрорезонаторах с модами шепчущей галереи, так как они намного компактней и дешевле. Полученный спектр поглощения парниковых газов приведен на рис. 2.

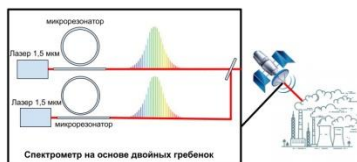


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

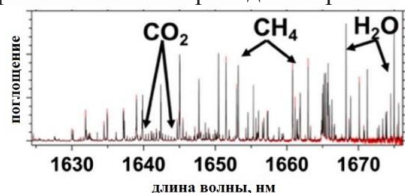


Рис. 2. Спектр поглощения парниковых газов

Список литературы

1. Zavala-Araiza D., Alvarez R.A., Lyon D.R., Allen D.T., Marchese A.J., Zimmerle D.J., Hamburg S.P. Super-emitters in natural gas infra- structure are caused by abnormal process conditions // Nat. Commun. 2017. V. 8, P. 14012.
2. Hall J.L. Nobel lecture: defining and measuring optical frequencies // Rev. Mod. Phys. 2006. V. 78. P. 1279-1295.
3. Hänsch T.W. Nobel lecture: passion for precision // Rev. Mod. Phys. 2006. V. 78. P. 1297.
4. Cossel K.C., Waxman E.M., Finneran I.A., Blake G.A., Ye J., Newbury N.R. Gas-phase broadband spectroscopy using active sources: progress, status, and applications // J. Opt. Soc. Am. B. 2017. V. 34. P. 104-129.
5. Coddington I., Newbury N., Swann W. Dual-comb spectroscopy // Optica. 2016. V. 3. P. 414.
6. Adler F., Thorpe M.J., Cossel K.C., Ye J. Cavity-enhanced direct frequency comb spectroscopy: technology and applications // Annu. Rev. Anal. Chem. 2010. V. 3. P. 175-205.

Д.П. СУДАС, Е.А. САВЕЛЬЕВ, П.И. КУЗНЕЦОВ, К.М. ГОЛАНТ
*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН*

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА МОДУЛЯТОР ДОБРОТНОСТИ НА ОСНОВЕ Bi_2Te_3 С ПОЛИМЕРНЫМ ПОКРЫТИЕМ В КОЛЬЦЕВОМ ВОЛОКОННОМ ЛАЗЕРЕ

Исследованы волоконные кольцевые эрбиевые лазеры, в режиме пассивной модуляции добротности. Модулятор добротности резонатора выполнен в виде секции химически утонённого одномодового световода с покрытием в виде тонкой плёнки Bi_2Te_3 покрытой двухкомпонентным силиконом. Помещённый в холодильник, изготовленный модулятор был последовательно вставлен в резонаторное кольцо лазера. Снижение температуры до $16,4^\circ\text{C}$ привело к изменению длины волны колебаний с 1560 до 1530 нм. Охлаждение сопровождалось уменьшением длительности лазерных импульсов. Уменьшение температуры пассивного модулятора добротности позволило получить импульсную генерацию лазера в схеме, не поддерживающей импульсный режим при комнатной температуре.

D.P. SUDAS, E.A. SAVELYEV, P.I. KUZNETSOV, K.M. GOLANT
Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS

EFFECT OF TEMPERATURE ON A SILICON-COATED Bi_2Te_3 Q-SWITCH IN A RING FIBER LASER

Erbium ring fiber lasers have been investigated in the passive Q-switched mode. The resonator Q-switch is made in the form of a section of a chemically thinned single-mode fiber with a coating in the form of a Bi_2Te_3 thin film coated with two-component silicone. Placed in a refrigerator, the manufactured modulator was sequentially inserted into the laser resonator ring. A decrease in temperature to 16.4°C led to a change in the wavelength of oscillations from 1560 to 1530 nm. Cooling was accompanied by a decrease in the duration of laser pulses. Reducing the temperature of the passive Q-switch made it possible to obtain pulsed lasing in a scheme that does not support the pulsed regime at room temperature.

Теллурид висмута Bi_2Te_3 [1] зарекомендовал себя как эффективный насыщающийся поглотитель для изготовления пассивных модуляторов добротности для волоконных лазеров. Этот материал относится к классу топологических изоляторов [2], имеющих поверхностные состояния, устойчивые к условиям окружающей среды, особенно к температуре [3].

Теллурид висмута демонстрирует нелинейные оптические свойства в широком спектральном диапазоне, при этом он имеет низкий порог насыщения и сверхкороткое время релаксации носителей заряда. Используя Bi_2Te_3 в сочетании с аморфной средой в виде полимера, можно ожидать сильной зависимости свойств получаемой смеси от температуры окружающей среды.

На химически утонённое оптическое одномодовое волокно методом MOCVD наносилась плёнка Bi_2Te_3 . После синтеза поверх наносилось покрытие из двухкомпонентного силикона, после чего структура встраивалась в кольцо резонатора волоконного лазера. Охлаждая секцию волокна с плёнкой и полимером в специально созданном холодильнике, фиксировали изменения в спектре генерации лазера. С понижением температуры линия смещалась в более коротковолновую область, после чего пропадала, вследствие слишком возросших потерь (рис. 1). Зависимость формы импульсов от температуры приведена на рис. 2.

Пропускание образца с утонённой частью длиной 4 мм и диаметром 12 мкм изменилось с 87 до 34 % на длине волны 1560 нм в результате покрытия его силиконом. При комнатной температуре для лазера с данным образцом не наблюдается импульсного режима во всём исследованном диапазоне мощностей накачки. Снижая температуру силикона, мы достигли импульсного режима за счёт увеличения поглощения света плёнкой насыщающегося поглотителя.

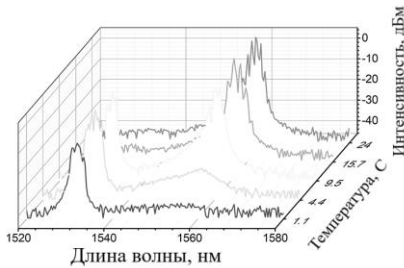


Рис. 1. Зависимость положения пика лазерной генерации от температуры

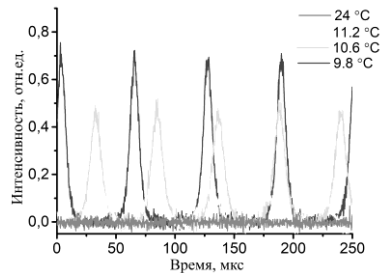


Рис. 2. Зависимость формы импульсов от температуры

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 20-37-90023.

Список литературы

1. Luo Z., Huang Y., et al. // Optics Express. 2013 V. 21(24). P. 29516-29522.
2. Ando Y. // J. Phys. Soc. Jpn. 2013. V. 82(10). P. 102001.
3. Lee C., Kim J.N., et al. // AIP Advances. 2018. V. 6. P. 115213.

Д.А. МУРАТОВ, Н.Э. НИКОЛАЕВ, Т.К. ЧЕХЛОВА

Российский университет дружбы народов, Москва

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТНЫХ СРЕД НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ТИТАНА С ЗОЛОТЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ

Проведено исследование спектральных свойств композитной среды, представляющей собой матрицу из диоксида титана с включёнными в неё золотыми частицами сферической формы. Получены спектры отражения, пропускания и поглощения данной структуры при разных углах падения излучения. Показано, что увеличение угла падения волны приводит к сдвигу кривых в область меньших длин волн, а увеличение показателя преломления матрицы – в длинноволновую область.

D.A. MURATOV, N.E. NIKOLAEV, T.K. CHEKHLOVA

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow

OPTICAL PROPERTIES OF COMPOSITE MEDIA BASED ON TITANIUM DIOXIDE WITH GOLD NANOPARTICLES

A study of the spectral properties of a composite medium, which is a matrix of titanium dioxide with embedded spherical gold particles, has been carried out. The reflection, transmission and absorption spectra of this structure are obtained at different radiation incidence angles. It is shown that an increase in the incidence angle leads to a shift of the curves to the region of shorter wavelengths, and an increase in the refractive index of the matrix – to a long-wavelength region.

В последнее время большое внимание уделяется исследованию композитных сред с наночастицами, которые обладают особыми свойствами, и могут быть использованы при создании нелинейных оптических устройств, сенсоров, устройств записи и передачи оптической информации [1]. Управление оптическими свойствами композитных плёнок может привести к улучшению их характеристик за счёт расширения спектра поглощения и увеличения амплитуды.

В работе проведено исследование композитной среды на основе диоксида титана с золотыми наночастицами. При анализе свойств такой среды использовалась модель эффективной среды Максвелла Гарнетта [1]. В работе получены выражения для коэффициентов отражения и

пропускания композитной среды, содержащей золотые наночастицы сферической формы. Расчёты спектров проводились для случая, когда объём содержащихся золотых частиц по сравнению с объёмом диоксида титана составлял 1 %.

Проведён расчёт дисперсионных зависимостей коэффициентов отражения и пропускания плёнки на основе диоксида титана с золотыми наночастицами при разных углах падения излучения (рис. 1).

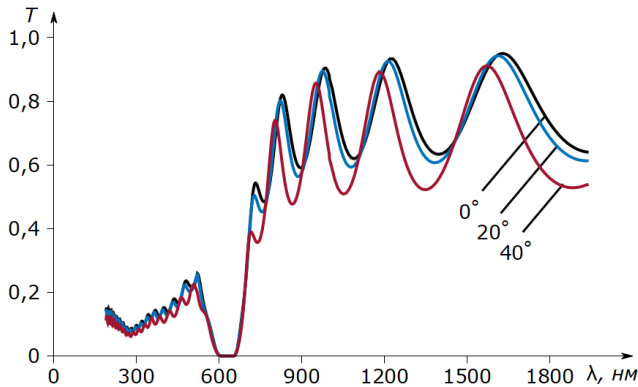


Рис. 1. Дисперсионные зависимости коэффициентов пропускания плёнки из диоксида титана с золотыми наночастицами при разных углах падения излучения

Анализ полученных спектров показал зависимость положения и амплитуды пиков поглощения от показателя преломления матрицы и угла падения электромагнитной волны на композитную среду, что связано с наличием плазмонного резонанса.

Увеличение показателя преломления матрицы приводит к смещению спектральной характеристики в длинноволновую область и увеличению ширины полосы поглощения плазмонного резонанса. Отклонение угла падения излучения от нормали вызывает сдвиг характеристик в сторону меньших длин волн.

Полученные результаты позволяют выбрать соответствующие параметры композитных сред для конкретного использования.

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.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970.

А.С. ШИШКИНА, Р.А. ЗАКОЛДАЕВ, О.В. АНДРЕЕВА

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ПРЯМАЯ ЛАЗЕРНАЯ ЗАПИСЬ СУБТРАКТИВНЫХ ТРЕКОВ ВНУТРИ ПОРИСТОЙ СИЛИКАТНОЙ МАТРИЦЫ

Предложена двухэтапная методика записи микроканалов внутри пористой силикатной матрицы (ПСМ). На первом этапе формируются субтрактивные треки внутри ПСМ действием сфокусированных пико- или фемтосекундных лазерных импульсов. На втором этапе проводится очищение треков от продуктов разрушения под действием ультразвука в воде. Дополнительно рассмотрено влияние термической обработки каналов.

A.S. SHISHKINA, R.A. ZAKOLDAEV, O.V. ANDREEVA

ITMO University, Saint-Petersburg

DIRECT LASER WRITING OF SUBTRACTIVE TRACKS INSIDE POROUS SILICATE MATRIX

A two-stage technique is proposed for microchannels writing inside a porous silicate matrix (PSM). In the first stage the fabrication of subtractive tracks inside PSM is carried out by pico- or femtosecond laser pulses. Then, the tracks are cleaned from the products of destruction in water under the action of ultrasound. We also considered the influence of thermal heating on the channels smoothing.

Микрофлюидные чипы позволяют оперировать малыми объёмами исследуемых жидкостей (нано- и пиколитрами) [1]. В таких чипах каждый микроканал обладает рядом функций: подача, накачка, смешивание, сепарация реагента. Этого достаточно для проведения лабораторного исследования на чипе миллиметрового масштаба [2]. Переход микрофлюидных устройств на силикатные материалы откроет новые возможности и направления.

Прямая лазерная запись с использованием ультракоротких лазерных импульсов стала мощным инструментом для прецизионной трёхмерной обработки силикатных материалов. Запись микроканалов обычно реализуется в результате селективного химического травления записанного трека модификации, который представляет собой локальную область разрушения [3].

Цель работы – разработка метода создания микроканалов в ПСМ, где на первом этапе проводится запись субтрактивных треков под действием

фемтосекундных лазерных импульсов, а на втором – очистка треков в воде под действием ультразвука.

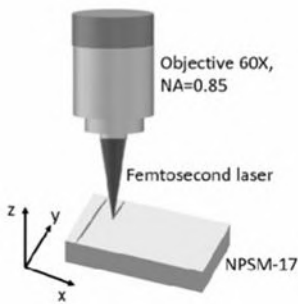


Рис 1. Схематическое изображение процесса лазерной записи субтрактивных треков внутри ПСМ

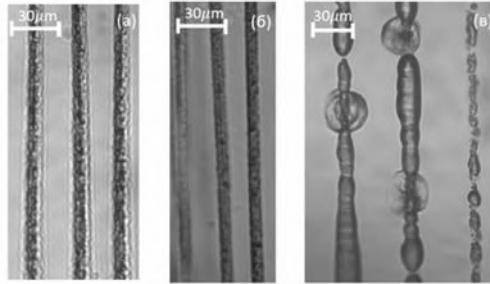


Рис 2. Микрофотографии микроканалов после лазерного воздействия (а), очистки в воде под действием ультразвука (б) и термической обработки в печи (в)

В ходе исследований решаются такие задачи, как создание микроканалов, формирование которых происходит в объёме ПСМ [4], под действием ультракоротких импульсов. На рис. 1 схематически представлен процесс лазерной записи. В качестве источника лазерных импульсов был использован фемтосекундный лазер Antaus-20W-20u/1M (1030 нм, 0,22 - 3 пс). Фокусировка лазерного излучения осуществлялась с помощью объектива (60X, NA = 0,85).

В результате лазерного воздействия были сформированы области разуплотнения пористой структуры образца. В сечение формируемого трека образуются продукты разрушения стекла (рис. 2), которые в дальнейшем очищаются в воде под действием ультразвука (150 мин, 31 °С). Также было проведено исследование влияния термической обработки каналов на сглаживание внутренней стенки каналов при температуре 800 °С на протяжении одного часа.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 20-71-10103).

Список литературы

1. Italia V., Giakoumaki V., et. al. // Micromachines. 2019. V. 10 (1). P. 23.
2. Schaap A., Rohrlack T., et. al. // Lab on a Chip. 2012. V. 12 (8). P. 1527-1532.
3. Li X., Xu, J., et. al. // Applied Surface Science. 2019. V. 485. P. 188-193.
4. Andreeva O.V., Obyknovennaya I.E., et. al. // Journal of optical technology. 2005. V. 72 (12). P. 916-922.

Ю.И. ЯНДЫБАЕВА, Р.А. ЗАКОЛДАЕВ, О.В. АНДРЕЕВА

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ПРЯМАЯ ЛАЗЕРНАЯ ЗАПИСЬ НЕПРОНИЦАЕМЫХ БАРЬЕРОВ В НАНОПОРИСТОЙ СИЛИКАТНОЙ МАТРИЦЕ

В данной работе продемонстрированы результаты лазерно-индуцированного контроля плотности и проницаемости в нанопористой силикатной матрице. Определены условия фокусировки и параметры лазерного излучения для записи непроницаемого барьера за одно сканирование. Также произведено тестирование барьеров для определения его проницаемости по отношению к молекулам органического красителя.

Yu.I. YANDYBAEVA, R.A. ZAKOLDAEV, O.V. ANDREEVA

ITMO University, Saint-Petersburg

DIRECT LASER WRITING OF IMPENETRABLE BARRIERS INSIDE NANOPOROUS SILICATE MATRIX

We present the results of laser-induced density and permeability control of a nanoporous silicate matrix. The focusing conditions and parameters of laser radiation for writing an impenetrable barrier by single scan were determined. Barriers were tested for permeability detection in relation to organic dye molecules.

Материалы с микроразмерными порами, например, нитроцеллюлоза или бумага, все чаще используются для создания микрофлюидных чипов для задач микроаналитики и сенсорики [1]. В большинстве случаев такие чипы являются одноразовыми, химически и механически не стойкими. Мы предлагаем рассмотреть использование более стойкой нанопористой силикатной матрицы (НПСМ) для записи таких чипов. Благодаря высокому содержанию SiO_2 НПСМ обладает высокой прозрачностью в видимом и ИК-диапазоне, повышенной химической и термической стойкостью [2]. Его дополнительное преимущество – система связанных между собой нанопор с контролируемым размером (5 - 50 нм).

Прямая лазерная запись с использованием ультракоротких импульсов – хороший инструмент для создания функциональных элементов в оптически прозрачных средах [3]. Ранее мы уже демонстрировали управление проницаемостью НПСМ для создания интегрального газоанализатора [4]. Ключевым элементом является барьер, состоящий из треков локального уплотнения, расположенных по всей толщине

пластины НПСМ. Как показали предварительные исследования, барьер способен фильтровать молекулы органического красителя в зависимости от их размера. Однако, запись одного барьера проводилась за множество этапов сканирования.

Целью данной работы является оптимизация записи такого барьера на всю толщину пластины НПСМ за одно сканирование и исследование его морфологии, геометрических размеров и проницаемости.

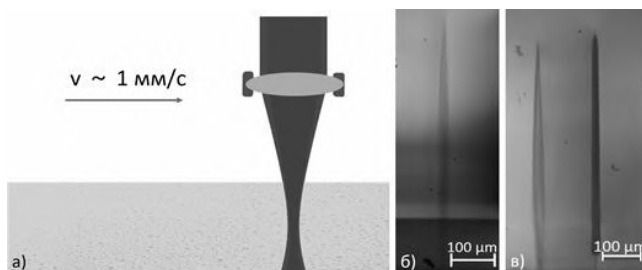


Рис 1. Схема записи барьера в НПСМ (а), барьер до пропитки (б) и после (в)

НПСМ на больше чем на 90 % состоит из SiO_2 и обладает сквозной структурой со средним размером пор 17 нм и пористостью $\sim 50\%$. Лазерная запись проводилась на установке по трёхмерной обработке материалов иттербиевым волоконным фемтосекундным лазером ANTAUS-20W-20u/1M, (Avesta Ltd., Москва, Россия) с $\lambda = 1030$ нм, $\tau = 220$ фс и ν до 1 МГц. Для фокусировки излучения выбрана плоско-выпуклая линза (Thorlabs LA4102, $f^* = 200$ мм). Длиннофокусная линза позволяет производить запись удлинённых структур (рис. 1а). При $P = 1540$ мВт и скорости сканирования 1 мм/с мы получили трек уплотнения с высотой ~ 700 мкм (рис. 1б). Для проверки проницаемости полученного барьера необходимо проводить пропитывание образца раствором красителя, чтобы исследовать, какой размер молекул барьер пропускает. Для тестирования был выбран водный раствор красителя тионина с массовой долей 0.009 % (рис. 1в).

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта НИРМА ФТ МФ Университета ИТМО.

Список литературы

1. Galanis P.P., He P.J.W., et. al. // Sens. Actuators B: Chem. 2020. V. 322. P. 128574.
2. Andreeva O.V., Obyknovennaya I.E., et. al. // Journal of optical technology. 2005. V. 72 (12). P. 916-922.
3. Tan D., Zhang B., et. al. // Laser & Photonics Reviews. 2021. V. 15(9). P. 2000455.
4. Veiko V.P., Zakoldaev R.A., et. al. // Optics express. 2018. V. 26 (21). P. 28150-28160.

В.А. ЯКИМУК, Я. АЛСАИФ, Р.А. ЗАКОЛДАЕВ, О.В. АНДРЕЕВА
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ПРЯМАЯ ЛАЗЕРНАЯ ЗАПИСЬ ОДНОМОДОВЫХ КАНАЛЬНЫХ ВОЛНОВОДОВ В ПОРИСТОЙ СИЛИКАТНОЙ МАТРИЦЕ

Приведены результаты по прямой лазерной записи одномодовых канальных волноводов внутри пористой силикатной матрицы. Проведены исследования основных оптических свойств волноводов и оценены оптические потери. Продемонстрирована чувствительность волноводов по отношению к малым молекулам.

V.A. YAKIMUK, Y. AL-SAIF, R.A. ZAKOLDAEV, O.V. ANDREEVA
ITMO University, Saint-Petersburg

DIRECT LASER WRITING OF SINGLE-MODE WAVEGUIDES IN POROUS SILICATE MATRIX

We present the result of direct laser writing of single-mode waveguides inside porous silicate matrix. The main optical characteristics were studied and optical losses were estimated. The waveguides demonstrated sensitivity to small molecules captured by the nanoporous matrix.

Основная функция волновода – концентрация излучения в очень малых объемах с сохранением относительно высокой интенсивности, что позволяет им найти широкое применение в создании интерферометров [1] и сенсоров различных молекул [2] на чипе. Эффективным способом формирования волноводов является прямая лазерная запись.

Запись волноводов в пористой силикатной матрице (ПСМ) открыла возможность изготовления по-настоящему объемных сенсоров, записанных на различной глубине ПСМ. Однако стоит вопрос характеристики волноводов, снижения оптических потерь и обеспечения волоконно-оптической стыковки с одномодовыми волокнами.

Таким образом, цель работы заключается в записи и характеристике канальных волноводов в ПСМ и оценки их сенсорных возможностей при захвате малых молекул нанопористым каркасом.

В качестве подложки для записи волноводов была использована пористая силикатная матрица с пористостью 50 % и размером пор 17 нм [3]. Формирование канальных волноводов производилось при

фокусировке (10X, 0,25 NA) фемтосекундных лазерных импульсов (Antaus-20W-20u/1M, Avesta Ltd) в ПСМ на глубину 100 - 400 мкм. Трёхкоординатная система позиционирования позволила записать симметричное расположение волноводов внутри ПСМ с периодом до 10 мкм между парами волноводов.

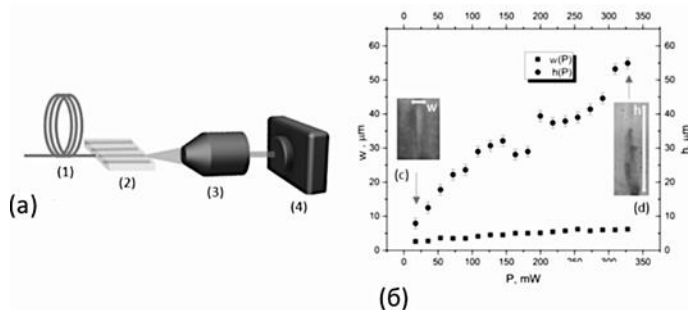


Рис 1. Схематическое изображение установки для тестирования канальных волноводов в ПСМ (а), результаты исследования геометрии канальных волноводов в зависимости от мощности лазерного излучения (б)

Тестирование волноводов производилось на установке, схема которой представлена на рис. 1а. Ввод излучения осуществлялся с помощью одномодового волокна (1). Прошедшее через волновод (2) излучение регистрируется с помощью КМОП-камеры (Gentec 3М) (4) в паре с объективом (40X, 0,65 NA) (3).

С помощью лазерной записи ($\lambda = 1035$ нм, $\tau = 220$ фс, $\nu = 200$ кГц, $\nu = 15$ мм/с и $P = 17 \div 327$ мВт) была выведена зависимость ширины w и высоты h сечения волноводов от мощности лазерного излучения P (рис. 1б). Было замечено, что по мере увеличения мощности излучения формировались ассиметричные волноводы с аспектным соотношением до 9,0.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта НИРМА ФТ МФ Университета ИТМО.

Список литературы

1. Gretzinger T., Gross S., et. al. // Optics express. 2019. V. 27. No. 6. P. 8626-8638.
2. Lijing Z., Zakoldaev R.A., et. al. // Nanomaterials. 2020. V. 10. No. 11. P. 2169.
3. Andreeva O.V., Obyknovennaya I.E., et. al. // Journal of optical technology. 2005. V. 72 (12). P. 916-922.

В.П. ЯКУНИН, Р.В. ГРИШАЕВ, С.И. ДЕРЖАВИН¹,
Я.В. КРАВЧЕНКО¹, Д.Н. МАМОНОВ¹

*Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиал
ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Шатура*

¹*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

МАСШТАБИРОВАНИЕ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ОДИНОЧНЫХ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ КВАНТОВО-КАСКАДНЫХ ЛАЗЕРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕТОВОДОВ СРЕДНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ СТЁКОЛ

В работе обсуждается концепция спектрального суммирования большого числа одиночных одномодовых распределённых квантово-каскадных лазеров, объединённых в линейку излучателей с использованием световодов среднего ИК-диапазона на основе халькогенидных стёкол.

V.P. YAKUNIN, R.V. GRISHAEV, S.I. DERZHAVIN¹,
Ya.V. KRAVCHENKO¹, D.N. MAMONOV¹

*Institute on Laser and Information Technologies of RAS – Branch of FSRC
“Crystallography and Photonics” of RAS, Shatura*

¹*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*

POWER SCALING OF A NUMBER OF SINGLE DISTRIBUTED QUANTUM CASCADE LASERS WITH THE USING OF MID-WAVE IR CHALCOGENIDE GLASS FIBERS

The concept of the spectral beam combining of a large number of single distributed quantum cascade lasers integrated into the linear array with the mid-wave IR chalcogenide glass fibers is discussed.

С момента появления первой теоретической работы в 1971 г. [1] о возможности создания в среднем ИК-диапазоне лазеров нового типа, так называемых квантово-каскадных лазеров (ККЛ), до создания первого ККЛ потребовалось более двадцати лет [2]. Генерация на ККЛ получена в диапазоне 3 - 24 мкм, как в непрерывном, так и в импульсном режимах, достигнутые мощности составили от десятых долей Вт в непрерывном режиме до десятков Вт в импульсном. ККЛ нашли широкое применение в различных областях – в спектроскопии, медицине, обнаружении и детектировании скрытых объектов, в ряде применений оборонного характера [3 - 5]. Вместе с тем, новые области применения требуют

существенно больших мощностей в сочетании с высоким качеством излучения. Одним из способов масштабирования мощности является некогерентное спектральное суммирование пучков отдельных ККЛ.

В состав дисперсионного резонатора, реализующего спектральное сложение пучков, помимо линейки излучателей (каждый излучатель представляет собой активную среду с глухим задним зеркалом и просветлённой выходной гранью), а также дифракционной решётки, на которой складываются пучки от отдельных излучателей, входят гомогенизирующие пучки микролинзы, согласующая линза и выходное полупрозрачное зеркало (такое зеркало в общем случае может иметь неоднородный спектральный коэффициент отражения [6], что способно заметно увеличить эффективность генерации дисперсионного резонатора).

Однако в случае использования линейки ККЛ на одном чипе число суммируемых пучков, как правило, невелико [7], что связано со сложностью технологии их изготовления.

В данной работе впервые предлагается альтернативная концепция суммирования большого числа одиночных одномодовых распределённых ККЛ, объединённых в линейку излучателей с использованием световодов среднего ИК-диапазона на основе халькогенидных стёкол. При этом отрезки световодов с просветлёнными входными и выходными гранями транспортируют излучение одиночных ККЛ, и формируют линейку излучателей дисперсионного резонатора. Предлагаемый способ позволит сложить излучение сотни и более ККЛ и достичь мощности до десятков Вт в непрерывном режиме генерации и сотен Вт в импульсном режиме с высоким качеством суммарного пучка.

В заключении отметим, что световоды на основе халькогенидных стёкол, допированные редкоземельными элементами, в перспективе сами могут стать эффективными источниками лазерного излучения в среднем ИК-диапазоне [8], и быть использованы в схеме спектрального сложения пучков в этой роли.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (Грант № 18-29-20086).

Список литературы

1. Kazarinov R.F., Suris R.A. // Soviet Physics - Semiconductors. 1971. V. 5 (4). P. 707.
2. Faist J., Capasso F., et. al. // Science. 1994. V. 264. P. 553.
3. Day T., Pushkarsky M., et. al. // Proc. SPIE. 2013. V. 8898. P. 889802.
4. Li S., Yang R., et. al. // Proc. SPIE. 2019. V. 11182. P. 111820Y.
5. Abramov P.I., Kuznetsov E.V., Skvortsov L.A. // J. of Opt. Tech. 2017. V. 84 (5). P. 331.
6. Якунин В.П., Фунтиков В.А., Дьячков П.Г. Патент RU 159472 U1. 2016
7. Lee B.G., Kansky J., et. al. // Proc. SPIE. 2019. V. 7460. P. 746004.
8. Churbanov M.F., Denker B.I., et. al. // Applied Physics B. 2020. V. 126. P. 117.

А.В. ШУЛЬГА, И.В. ШИЛОВА

Белорусско-Российский университет, Могилёв

ВОЗБУЖДЕНИЕ ВОЛНОВОДНЫХ ТЕ-МОД ВНУТРИРЕЗОНАТОРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ЛАЗЕРА

Экспериментально продемонстрировано возбуждение волноводных мод ТЕ-типа методом внутрирезонаторной лазерной спектроскопии. Возбуждение осуществлялось брюстеровским призмным устройством связи двойного полного внутреннего отражения. Были получены внутрирезонаторные спектры отражения.

A.V. SHULGA, I.V. SHILOVA

Belarusian-Russian university, Mogilev

EXCITATION OF TE-GUIDED MODES WITH INTRACAVITY LASER RADIATION

Excitation of TE-guided by the intracavity laser spectroscopy technique was demonstrated experimentally. The excitation was performed using a Brewster prism coupler of double internal reflection. Intracavity reflectance spectra were obtained.

Возбуждение волноводных мод планарных диэлектрических волноводов внутрирезонаторным излучением лазера для измерения слабых потерь лежит в основе методов внутрирезонаторной волноводной спектроскопии [1]. В работе [2] было предложено брюстеровское призмное устройство связи, предназначенное для внутрирезонаторного возбуждения волноводных ТМ-мод, в котором ТМ-поляризованное излучение падало под углом Брюстера на входную-выходную грань призмы связи, претерпевало двукратное полное внутренне отражение и падало на другую входную-выходную грань призмы под углом Брюстера. Таким образом, внутрирезонаторное излучение по обе стороны призмы имело одинаковое направление распространения, что позволяло избегать разюстировки резонатора при повороте призмы.

Целью данной работы является экспериментальная демонстрация возбуждения ТЕ-волноводных мод внутрирезонаторным излучением. Как правило, оптические элементы, помещённые в резонатор лазера, являются источниками внутрирезонаторных потерь. В случае лазеров со слабым коэффициентом усиления, эти потери выше усиления лазера. Потери, вызванные поглощением света, могут быть устранены подбором материала призмы с низким коэффициентом поглощения на рабочей длине

волны. Вопрос потерь на отражения в наше случае был решён особой конфигурацией призмы связи, в которой ТМ-поляризованное излучение падало на входную-выходную грань призмы по углом Брюстера. Для возбуждения ТЕ-мод была изготовленная брюстеровская призма связи, в которой входные-выходные грани были направлены таки образом, чтобы падающее на них излучение имело ТМ-поляризацию, а после преломления оно было ТЕ-поляризовано относительно основания призмы, к которому прижат волновод.

Экспериментальная установка, а также внутрирезонаторные спектры отражения представлены на рис. 1а и 1б, соответственно.

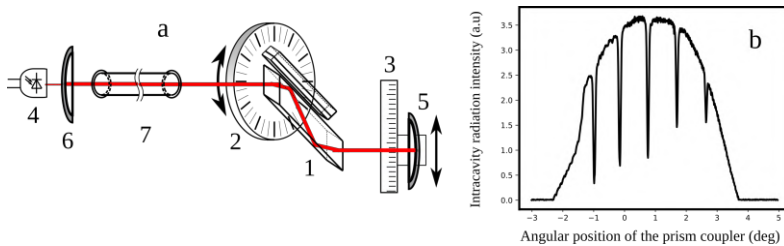


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – брюстеровская призма связи, 2 – поворотная платформа, 3 – платформа продольного перемещения, 4 – фотодетектор, 5, 6 – глухие зеркала, 7 – газоразрядная трубка (а) и внутрирезонаторные спектры отражения (б)

Таким образом, экспериментально было продемонстрировано возбуждение ТЕ-мод в планарном волноводе внутрирезонаторным излучением гелий-неонового лазера. Предположенный метод может быть использован для увеличения чувствительности датчиков на основе призмных элементов связи.

Список литературы

1. Shulga A.V., Khomchenko A.V., et. al. // Technical Physics Letters. 2018. V. 44 (11). P. 953-955.
2. Shulga A.V. // Appl. Opt. 2020. V. 59. P. 3992-3994.

М.М. ЗУЕВА, Н.Э. НИКОЛАЕВ, Т.К. ЧЕХЛОВА

Российский университет дружбы народов, Москва

ДИСПЕРСИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКИХ ТОНКОПЛЁНОЧНЫХ ВОЛНОВОДОВ СО СТУПЕНЧАТЫМ ПРОФИЛЕМ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Методом формул сдвига рассчитаны дисперсионные характеристики плоского четырёхслойного оптического волновода. Выявлено наличие аномального участка дисперсионной кривой. Определена зависимость его формы и расположения от параметров слоёв волноводной системы и установлена возможность управления положением этого участка, что существенно для эффективной стыковки волноводных элементов фотоники и других приложений.

M.M. ZUEVA, N.E. NIKOLAEV, T.K. CHEKHLOVA

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow

DISPERSION CHARACTERISTICS OF THIN-FILM OPTICAL WAVEGUIDES WITH A STEP REFRACTIVE INDEX PROFILE

The dispersion characteristics of a planar four-layer optical waveguide are calculated by the method of shift formulas. The presence of an anomalous region of the dispersion curve was revealed. The dependence of its shape and location on the parameters of the layers of the waveguide system is determined, and the possibility of the control of this region position is established, which is important for the effective joining of the waveguide elements of photonics and other applications.

Использование многослойных волноводных структур позволяет расширить функциональные возможности волноводных устройств оптоэлектроники, в частности, в значительной степени облегчить сопряжение интегрально-оптических схем с электронными схемами. Кроме того, использование слоёв, обладающих специфическими свойствами, позволит создать на их основе активные и управляемые элементы фотоники.

В настоящей работе приведены результаты исследования дисперсионных свойств четырёхслойных планарных волноводных структур (ПВС), наиболее интересных с точки зрения их использования. Профили показателя преломления, показаны на рис. 1. Исследования проводились на основе метода формул сдвига [1], который позволяет

рассчитывать дисперсионные характеристики волноводов с самыми разными профилями.



Рис. 1. Профили показателя преломления ПВС I (а) и ПВС II (б)

Рассчитаны дисперсионные характеристики для ПВС, состоящих из двух планарных слоёв на подложке с показателями преломления: ПВС I – $n_1 = 1$; $n_2 = 1,80$; $n_3 = 2,15$; $n_4 = 1,51$; (рис. 1а); ПВС II – $n_1 = 1$; $n_2 = 2,15$; $n_3 = 1,80$; $n_4 = 1,51$ (рис. 1б).

На дисперсионных характеристиках наблюдался аномальный (почти горизонтальный для ПВС I) участок между двумя областями, которые соответствовали трёхслойным ПВС с волноведущими слоями: слева – $n_2 = 1,80$ и справа – $n_3 = 2,15$ (рис. 2). Наличие аномального участка объясняется конкуренцией двух этих волноводов, что подтверждается соответствующим распределением мощности в рассматриваемых четырёхслойных ПВС. Определена зависимость формы и расположения аномального участка от параметров слоёв ПВС.

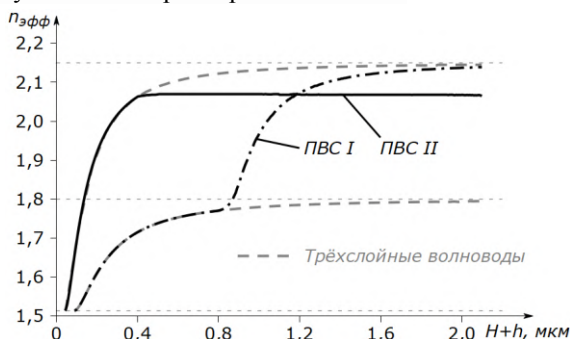


Рис. 2. Дисперсионные зависимости для ПВС I и ПВС II и для двух трёхслойных волноводов с волноведущими слоями ($n_3 = 1,80$ и $n_3 = 2,15$)

Список литературы

1. Николаев Н.Э., Шевченко В.В. Метод формул сдвига в применении к заглублённым планарным оптическим волноводам // РЭ. 1997. Т. 42. № 8. С. 901-903.

Р.В. ГРИШАЕВ, В.П. ЯКУНИН

*Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиал
ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Шатура*

ТЕРМООПТИЧЕСКИЕ ИСКАЖЕНИЯ ПУЧКОВ ПРИ СПЕКТРАЛЬНОМ СУММИРОВАНИИ В ДИСПЕРСИОННОМ РЕЗОНАТОРЕ

Представлена численная модель, позволяющая оценивать влияние термооптических искажений согласующей линзы в схеме спектрального сложения лазерных пучков в дисперсионном резонаторе. Приводятся результаты расчётов, которые показывают влияние плотности мощности излучения на эффективность генерации лазерных источников и качество их излучения.

R.V. GRISHAEV, V.P. YAKUNIN

*Institute on Laser and Information Technologies of RAS – Branch of FSRC
“Crystallography and Photonics” of RAS, Shatura*

THERMOOPTICAL DISTORTIONS OF LASER BEAMS IN SPECTRAL BEAM COMBINING SYSTEM

The numerical model have been developed which allow us to estimate the influence of the transform lens thermooptical distortions in the spectral beam combining in the external resonator. The results of calculations show the dependence of the coupling efficiency of the emitters and beam quality on the power density of the laser radiation.

Схема спектрального сложения пучков в дисперсионном резонаторе позволяет выполнять масштабирование мощности лазерных источников с сохранением качества излучения отдельного источника [1, 2]. В этой схеме используется дифракционная решётка, на которой происходит сложение и пространственное совмещение пучков от разных источников с разными длинами волн, проходящих на решётку под разными углами. Согласующая положительная линза преобразует расстояние от отдельного источника в линейке до оптической оси резонатора в угол падения пучка на дифракционную решётку. Для этого линейка излучателей и дифракционная решётка располагаются по обе стороны от линзы на фокусном расстоянии. Полупрозрачное выходное зеркало дисперсионного резонатора обеспечивает для каждого источника в линейке соответствие расстояния от источника до оптической оси резонатора и его длины волны

генерации таким образом, чтобы выполнялось условие самовоспроизведения поля после полного обхода резонатора.

Эффективность лазерной генерации излучателей в такой схеме и качество выходного излучения зависят от многих факторов [3, 4], в том числе от термооптических эффектов на согласующей линзе, вызванных нагревом мощным лазерным излучением.

Целью работы является численное исследование процесса распространения лазерного излучения в дисперсионном резонаторе с учётом термооптических эффектов на согласующей линзе. Такое исследование представляется необходимым для определения влияния термооптических эффектов в согласующей линзе на эффективность генерации и качество выходного излучения дисперсионного резонатора.

Для моделирования распространения лазерного излучения использовалось разложение поля по эрмит-гауссовым модам [5]. В соответствии с суммарным распределением интенсивности излучения пучков на линзе считалось температурное поле, наведённое в линзе, и вызванный им дополнительный фазовый набег для волновых фронтов пучков. Также учитывалась доля излучения каждого источника, попадающая обратно в источник после полного обхода резонатора.

Результаты расчётов позволяют оценить эффективность генерации лазерных источников и качество их излучения в зависимости от плотности мощности излучения, падающего на согласующую линзу.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (Грант № 18-29-20086).

Список литературы

1. Daneu V., Sanchez A., et. al. // Optics Letters. 2000. V. 25. P. 405-407.
2. Sanchez-Rubio A., Fan T.Y., et. al. // Lincoln Laboratory Journal. 2014. V. 20. P. 52.
3. Bochove E.J. // IEEE Journal of Quantum Electronics. 2002. V. 38. P.432.
4. Haas M., Rauch S., et. al. // IEEE Journal of Quantum Electronics. 2017. V. 53. P. 1-11.
5. Siegman A.E., Sziklas E.A. // Appl. Opt. 1974. V. 13. P. 2775.

В.Е. АНИКЕЕВА^{1,2}, К.Н. БОЛДЫРЕВ¹, О.И. СЕМЕНОВА³,
М.Н. ПОПОВА¹

¹*Институт спектроскопии РАН, Троицк*

²*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Москва*

³*Институт физики полупроводников им А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск*

ПОЛЯРИЗОВАННЫЕ СПЕКТРЫ ОТРАЖЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ MAPbI_3 В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Исследованы поляризованные спектры отражения высокого разрешения монокристалла MAPbI_3 в диапазоне $15 - 600 \text{ см}^{-1}$ при низких температурах. Используя данные фактор-группового анализа и результаты расчётов из литературных источников, были определены симметрии мод, обнаруженных в экспериментальных спектрах.

V.E. ANIKEEVA^{1,2}, K.N. BOLDYREV¹, O.I. SEMENOVA³,
M.N. POPOVA¹

¹*Institute for Spectroscopy of the RAS, Troitsk*

²*National Research University «Higher School of Economics», Moscow*

³*Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk*

POLARIZED REFLECTION SPECTRA OF MAPbI_3 SINGLE CRYSTALS IN THE TERAHERTZ RANGE

High-resolution polarized reflection spectra of a MAPbI_3 single crystal in the range $15 - 600 \text{ cm}^{-1}$ at low temperatures are studied. Using the data of factor-group analysis and the results of calculations from the literature, the symmetries of the modes found in the experimental spectra were determined.

Солнечные элементы на основе гибридного перовскита, трийодида метиламмония свинца (MAPbI_3) привлекают внимание сообщества исследователей фотоэлектрических систем благодаря уникальным свойствам этого материала. Достигнутый КПД таких солнечных элементов на данный момент составляет 25,5 % [1]. Исследование колебательных мод в MAPbI_3 очень важно для полного понимания оптоэлектронных свойств этих материалов. Например, в работе [2] было показано, что люминесценция MAPbI_3 демонстрирует значительное однородное уширение в результате сильного фононного взаимодействия. Несмотря на большое количество работ по изучению колебательных мод в

MAPbI₃ методами инфракрасной спектроскопии, нами не было обнаружено исследований, посвящённых колебательной структуре этого перспективного фотовольтаика при различных поляризациях света.

Известно, что в MAPbI₃ существует три структурные фазы: кубическая (пр. гр. *Pm-3m*) при температурах выше 340 К, ромбическая (пр. гр. *Rnma*) при температурах ниже 160 К, представленная на рис. 1, и тетрагональная (пр. гр. *I4/mcm*) в промежуточном диапазоне температур [3]. Исследование нормальных мод целесообразно проводить именно в ромбической фазе, ввиду того, что при высоких температурах катионы метиламмония могут вращаться, что требует усреднения по нескольким возможным ориентациям катионов и усложняет анализ полученных спектров [4].

В данной работе представлены спектры отражения монокристалла MAPbI₃ в диапазоне от 15 до 680 см⁻¹ (0,75 - 20,38 ТГц) при температуре 10 К для двух случаев поляризации. Используя фактор-групповой анализ и результаты расчётных исследований, приведённых в работе [5], удалось определить, что на спектрах отражения, представленных на рис. 2 пунктирной и сплошной линией, присутствуют линии, принадлежащие модам симметрии V_{1u} и V_{3u} , соответственно. Моделирование измеренных спектров позволило определить параметры мод для каждой симметрии и сравнить их с расчётными данными.

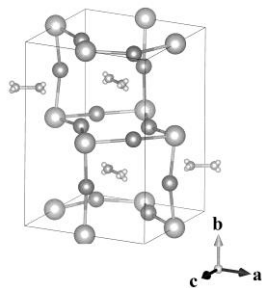


Рис. 1. Структура MAPbI₃ в ромбической фазе (T < 160 К)

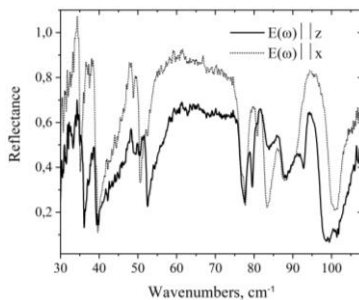


Рис. 2. Спектры отражения MAPbI₃ (T = 10 К), измеренные для двух случаев поляризации падающего света

Список литературы

1. Best Research-Cell Efficiency Chart. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>.
2. Wehrenfennig C., Liu M., et al. // J. Phys. Chem. Lett. 2014. V. 5. P. 1300-1306.
3. Whitfield P.S., Herron N., et al. // Sci Rep. 2016. V. 6. P. 35685.
4. Filip M.R., Giustino F. // Phys. Rev. B. 2014. V. 90. P. 245145.
5. Pérez-Osorio M.A., Milot R.L., et al. // J. Phys. Chem. C. 2015. V. 119. P. 25703-25718.

В.Р. БИЛЫК, А.В. ОВЧИННИКОВ¹, А.В. ЧЕФОНОВ¹

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

¹*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва*

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ШИРОКО- И УЗКОПОЛОСНОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНДУЦИРОВАННОЙ ДИНАМИКИ В ТВЁРДЫХ ТЕЛАХ

В работе представлена универсальная настольная лазерная платформа для генерации электромагнитных импульсов терагерцового (ТГц) диапазона, с возможностью генерации как широкополосных ТГц-импульсов, так и спектрально ограниченных перестраиваемых по частоте. Продемонстрирована возможность использования таких импульсов для исследования динамики поляризации в сегнетоэлектрическом кристалле германата свинца, легированного кремнием.

V.R. BILYK, A.V. OVCHINNIKOV¹, A.V. CHEFONOV¹

MIREA – Russian Technological University, Moscow

¹*Joint Institute for High Temperatures of the RAS, Moscow*

UNIVERSAL STAND FOR GENERATION OF WIDEBAND AND NARROWBAND TERAHERTZ PULSES FOR STUDY OF INDUCED DYNAMICS IN SOLIDS

The universal table-top laser setup for generating electromagnetic pulses in the terahertz (THz) range, with the ability to generate both broadband THz pulses and spectrally limited frequency tunable pulses is demonstrated. The result of using such pulses to study the dynamics of polarization in a ferroelectric crystal of silicon-doped lead germanate is shown.

Беспрецедентные значения напряжённости поля МВ/см (в одном цикле колебания поля) и сотни кВ/см (в многоцикловых импульсах) открывают новые научные возможности для селективного и нелинейного возбуждения низкоэнергетических мод в конденсированных средах [1, 2]. Источниками спектрально ограниченных перестраиваемых по частоте терагерцовых (ТГц) импульсов зачастую являются лазеры на свободных электронах, что осложняет возможность проведения такого рода экспериментов. В работе представлена универсальная терагерцовая лазерная платформа, производящая субоднопериодные терагерцовые импульсы с пиковым полем в десятки МВ/см, а также перестраиваемые по

частоте спектрально узкие импульсы. Показан результат воздействия таких импульсов на сегнетоэлектрический кристалл для исследования ТГц индуцированной динамики поляризации.

Генерация ТГц-импульсов происходила за счёт эффекта оптического выпрямления фемтосекундных лазерных импульсов в нелинейно-оптическом органическом кристалле ОН1 [3]. Временная форма и частотный спектр анализировался методом терагерцовой спектроскопии с временным разрешением. Перестройка центральной частоты спектрально ограниченных ТГц-импульсов происходила за счёт модификации схемы путём установки дополнительного плеча, вводящего второй оптический импульс с переменной задержкой. В результате два оптических импульса испытывают биение на определённой частоте $f = 2b\tau$. Изменяя задержку τ между двумя оптическими импульсами, можно контролировать частоту модуляции оптического луча накачки, который затем используется для генерации ТГц-импульса.

В качестве среды для исследования воздействия таких импульсов был использован сегнетоэлектрический монокристалл германата свинца, легированный кремнием $(\text{Pb}_5(\text{Ge}_{0.74}\text{Si}_{0.26})_3\text{O}_{11})$, находящийся в сегнетофазе при комнатной температуре. Исследование проводилось на установке, собранной по схеме терагерцового возбуждения – нелинейно-оптического зондирования на частоте второй оптической гармоники. Благодаря высокой чувствительности к изменению пространственной симметрии излучение на частоте ВГ выбрано в качестве эффективного инструмента исследования динамики поляризации.

Эксперименты были проведены на уникальной научной установке «Лазерный тераваттный фемтосекундный комплекс» в центре коллективного пользования «Лазерный фемтосекундный комплекс» Объединённого института высоких температур РАН.

Настоящее исследование частично финансировалось за счёт грантов РФФИ и Госкорпорацией «Росатом» в соответствии с исследовательским проектом № 20-21-00043 и РФФИ № 18-02-40027.

Список литературы

1. Li X., Qiu T., Zhang J., et. al. // Science. 2019. V. 364. P. 1079.
2. Grishunin K., Bilyk V., et. al. // Sci. Rep. 2019. V. 9. P. 697.
3. Vicario C., Jazbinsek M., et. al. // Opt. Express. 2015. V. 23. P. 4573.

В.В. КОСТРОМЫКИНА^{1,2}, А.А. СКРЫБЫКИНА^{1,2},
Г.С. РОГОЖНИКОВ²

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (филиал),
Саров, Нижегородская обл.

²РФЯЦ – Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики, Саров, Нижегородская обл.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПИРОПРИЁМНИКОВ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛЯ ЗОНДИРОВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ

Исследован процесс зондирования биологических тканей *in vitro* с использованием пироприёмника на основе кристалла танталата лития, зарегистрировано пропускание, поглощение и рассеяние терагерцового излучения соединительными тканями, жировой тканью и жидкостями.

V.V. KOSTROMYKINA^{1,2}, A.A. SKRYBYKINA^{1,2},
G.S. ROGOZHNIKOV²

¹Sarov branch of Lomonosov Moscow State University, Nizhny Novgorod region

²All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Nizhny Novgorod region

RESEARCH OF THE POSSIBILITY OF USING THE TERAHERTZ BAND PYROELECTRIC DETECTORS FOR PROBING BIOLOGICAL TISSUES

The range of biological tissues has been tested *in vitro* by means of pyroelectric detector based on the lithium tantalate crystal. Transmission, absorption and dispersion of THz radiation by connective tissues, adipose tissues and liquids have been registered.

Излучение терагерцового (ТГц) диапазона частот проникает сквозь многие материалы, в том числе и биологические ткани, что при его сравнительно малой расходимости позволяет создавать устройства для дистанционного зондирования, получения изображений и информации о химическом составе тканей. Главное преимущество ТГц-зондирования – его полная безопасность по сравнению с прочими распространёнными методами диагностических исследований (например, с рентгеновскими).

Для зондирования в ТГц-диапазоне необходим источник излучения, непрерывного или импульсного, а также чувствительный приёмник, т.к. поглощение тканями достаточно велико. В качестве источников в зависимости от требуемого диапазона частот используют

фотопроводящие антенны, нелинейно-оптические кристаллы, лавинно-пролётные диоды, умножители частоты и т.п. От мощности излучения и длины волны источника зависит глубина проникновения излучения в биологические ткани. В приёмниках излучения для детектирования сигнала используются полупроводниковые структуры, болометры, сегнетоэлектрические кристаллы и т.п. Их основные параметры (рабочий спектральный диапазон, чувствительность, динамический диапазон, частота модуляции, уровень шума) определяют возможность их использования с теми или иными источниками, а также с различными типами биологических тканей.

В ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» ведется работа по созданию систем дистанционного зондирования в ТГц-диапазоне в интересах создания систем видения, медицинских применений и фундаментальных научных исследований [1, 2]. Одним из широко используемых типов приёмников ТГц-излучения в данных проектах является пироприёмник на основе кристаллов LiTaO_3 (танталат лития) из-за своей высокой пьезоэлектрической активности и хорошей термостабильности.

Для зондирования биологических тканей *in vitro* в интересах разработки диагностического прибора медицинского назначения был использован LiTaO_3 пироприёмник с рабочей полосой 0.1 - 3 ТГц, динамическим диапазоном ($10^{-7} \div 10^{-4}$) Вт и уровнем шума 1 мВ при максимальной амплитуде сигнала 9 В. Исследовалось пропускание, поглощение и рассеяние соединительных тканей, жировой ткани и биологических жидкостей на частотах 0.14, 0.3 и 0.5 ТГц. Источником излучения служили IMPATT диоды с умножителями частоты.

Список литературы

1. Rogozhnikov G.S., Mishina I.V. // Proc. of Int. conf. "Laser Optics-2016", SPb, 2016.
2. Рогожников Г.С., Костюнин Р.Ю., Мишина И.В. // Сб. трудов Междунар. Конф. «Лазеры. Измерения. Информация». Санкт-Петербург, 2014.

С.А. ФИЛИН, В.Е. РОГАЛИН¹, И.А. КАПЛУНОВ²

Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва

¹*Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург*

²*Тверской государственный университет*

КОНТРОЛЬ ХИМИЧЕСКОЙ ЧИСТОТЫ ОПТИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Приведены результаты экспериментов по эллипсометрическому измерению параметров загрязняющих плёнок на поверхности свежеполированных и побывавших в эксплуатации металлических зеркал из меди и её сплава, алюминия и его сплавов, оптических стёкол, монокристаллов NaCl, BaF₂ и сапфира. Определены условия целесообразности использования метода эллипсометрии для количественного анализа концентрации загрязнений на оптической поверхности элементов.

S.A. FILIN, V.E. ROGALIN¹, I.A. KAPLUNOV²

Plekhanov Russian University of Economics, Moscow

¹*Institute of Electrophysics and Electric Power Engineering of the RAS, Saint-Petersburg*

²*Tver State University*

CONTROL OF THE CHEMICAL PURITY OF THE OPTICAL SURFACE OF THE ELEMENTS BY THE ELLIPSOMETRIC METHOD

The results of experiments on the ellipsometric measurement of the parameters of contaminating films on the surface of freshly polished and used metal mirrors made of copper and its alloy, aluminum and its alloys, optical glasses, single crystals of NaCl, BaF₂ and sapphire are presented. The conditions for the expediency of using the ellipsometry method for quantitative analysis of the concentration of contaminants on the optical surface of elements are determined.

Наличие загрязнений на оптической поверхности может привести к ухудшению параметров оптического элемента при воздействии на его поверхность интенсивного лазерного излучения [1], в частности, значительно снизить порог оптической стойкости. Поэтому задача контроля химической чистоты поверхности оптических элементов с использованием метода эллипсометрического контроля как неразрушающей, бесконтактной оптической контрольно-измерительной технологии является в настоящее время весьма актуальной. Целью работы

является экспериментальное исследование параметров загрязняющих плёнок на оптической поверхности элементов эллипсометрическим методом. На основании данных по оптическим свойствам материалов рассчитывались значения ψ и Δ для определяемых чистых материалов измеряемого оптического элемента по уравнению

$$\rho = \frac{R_p}{R_s} = \operatorname{tg} \psi e^{i\Delta},$$

где $\operatorname{tg} \psi = \frac{A_p^r / A_p^i}{A_s^r / A_s^i}$ – относительное изменение амплитуд; ψ и Δ – эллипсометрические параметры отражающей системы, измеряемые в угловых градусах; $\Delta = \operatorname{arctg} \left(\frac{R_p}{R_s} \right) = (\sigma_p - \sigma_s)$ – относительное изменение

фаз p и s -компонентов электрического вектора E световой волны при отражении. Данные расчётов приведены в табл. 1. В табл. 2 приведены диапазоны углов поворота поляризатора P и анализатора A измеряемого оптического элемента для представленных материалов.

Таблица 1. Значения эллипсометрических параметров для чистых материалов

Материал оптических элементов	ψ	Δ	n	K
Cu	43,37°	1000,97°	0,19°	2,98°
Al	41,80°	141,41°	1,30°	7,11°
Стекло марки К-8	20,27°	0,72°	1,52°	0,01°
Al ₂ O ₃	15,44°	0,78°	1,76°	0,01°
NaCl	19,48°	0,72°	1,55°	0,01°

Таблица 2. Диапазоны углов поворота поляризатора и анализатора

Материал оптических элементов	Диапазон 1	Диапазон 2
Медь и её сплавы (Моб, БрЦр)	$P = 268^\circ - 278^\circ$ $A = 310^\circ - 320^\circ$	$P = 0^\circ - 10^\circ$ или $350^\circ - 360^\circ$ $A = 225^\circ - 235^\circ$
Алюминий и его сплавы АМГ-6, АЛ-9, АЛ-24	$P = 262^\circ - 272^\circ$ $A = 308^\circ - 318^\circ$	$P = 355^\circ - 5^\circ$ $A = 230^\circ - 240^\circ$
NaCl, BaF ₂	$P = 262^\circ - 272^\circ$ $A = 308^\circ - 318^\circ$	$P = 355^\circ - 5^\circ$ $A = 230^\circ - 240^\circ$
К-8, К-108, Al ₂ O ₃	$P = 40^\circ - 50^\circ$ $A = 278^\circ - 290^\circ$	$P = 310^\circ - 320^\circ$ $A = 250^\circ - 260^\circ$

В случае отличия полученных Δ и ψ от данных в табл. 1 определяли толщину и показатель преломления плёнки загрязнения, используя номограммы для соответствующих материалов.

Список литературы

1. Роголин В.Е., Каплунов И.А. Оптические свойства металлических зеркал для СО₂-лазеров // Изв. Сочинского государственного университета. 2013. № 4-2 (28). С. 120-127.

Д.С. УКОЛОВ¹, А.А. БАЛУЕВ^{1,2}, А.А. ПЕЧЕНКИН^{1,2},
В.П. ЛУКАШИН^{1,2}, П.С. ГРОМОВА^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²ЭНПО «Специализированные электронные системы», Москва

ЛАЗЕРНЫЙ СКАНИРУЮЩИЙ КОНФОКАЛЬНЫЙ ИК-МИКРОСКОП ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР И ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

В работе рассмотрены особенности и возможности разработанного лазерного сканирующего конфокального ИК-микроскопа в задаче неразрушающего контроля полупроводниковой электроники. Описаны технические средства и методы анализа неразрушающего контроля интегральных схем (ИС).

D.S. UKOLOV¹, A.A. BALUEV^{1,2}, A.A. PECHENKIN^{1,2},
V.P. LUKASHIN^{1,2}, P.S. GROMOVA^{1,2}

¹National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

²Specialized Electronic Systems, Moscow

LASER SCANNING CONFOCAL IR MICROSCOPE FOR RESEARCH AND NON-DESTRUCTIVE TESTING OF SEMICONDUCTOR STRUCTURES AND ICs

The article discusses the features and capabilities of the developed laser scanning confocal infrared microscope (LSCIM) in the problem of non-destructive testing of semiconductor electronics. The technical means and methods of analysis for non-destructive testing of integrated circuits (IC) are described.

Разработчики высоконадёжной и целевой аппаратуры сталкиваются с проблемой повышения надёжности изделий электронной компонентной базы из-за недостатка технических средств, в свою очередь испытательные центры, оснащённые средствами оценки качества микросхем, зачастую не обладают достаточной информацией об исследуемом изделии. Для решения актуальных проблем производства и испытаний изделий микроэлектроники в данной работе разработана установка для неразрушающего контроля, проведения исследований с применением лазерных методов, поиска скрытых дефектов структуры и выявления контрафактных изделий.

Установка лазерного сканирующего конфокального ИК-микроскопа (ЛСКИМ) имеет (рис. 1) блоки управления лазерными диодами (2), сканирующей системой (11), позиционной системой (13), конфокальный модуль (4), а также включает в себя осциллограф (5) и ИК-камеру (9).

Поскольку многие полупроводники оптически прозрачны для излучения ближнего ИК-диапазона [1], а коэффициент поглощения зависит от уровня легирования [2], в разработанном ЛСКИМ (рис. 2) применяются четыре лазерных источника с различными длинами волн из ближнего ИК. Сканирование исследуемого объекта происходит по элементарным объёмам. После программной обработки массива данных, содержащего координаты элементарных объёмов и интенсивности отражённых от них лазерных пучков для каждой длины волны, воссоздаётся трёхмерное изображение сканируемого объекта. Конфокальная фильтрация [3] отражённого пучка позволяет добиться повышения контрастности и разрешения изображения, а применение лазеров с различными длинами волн – различить соседние слои с различной степенью легирования [4].

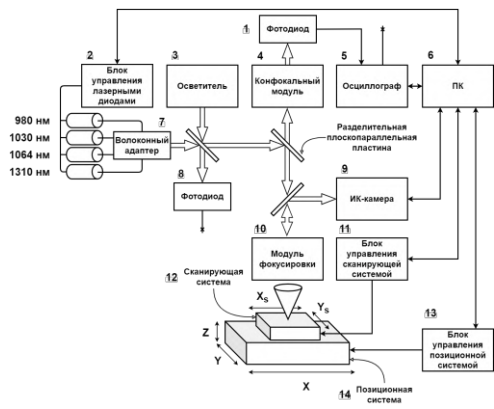


Рис. 1. Структурная схема ЛСКИМ

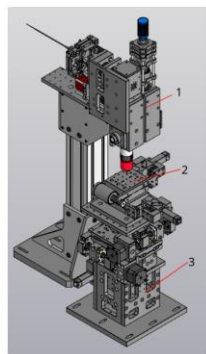


Рис. 2. Общий вид: 1 – ЛСКИМ; 2 – система сканирования; 3 – система позиционирования

Список литературы

1. Sood A., Zeller J. Sige focal plane array detector technology for near-infrared imaging // International Journal of Engineering Research and Technology. 2015. V. 10. P. 81-103.
2. Falk R.A. Near IR absorption in heavily doped silicon – an empirical approach // Proceedings ISTFA. 2000. P. 121.
3. Webb R.H. Confocal optical microscopy // Rep. Prog. Phys. 1996. V. 59. P. 427-471.
4. Baluev A.A., Ukolov D.S., Pechenkin A.A., Mozhaev R.K. // Application of confocal microscopy methods for research and non-destructive examination of semiconductor structures and integrated circuits // IEEE 32nd International Conference on Microelectronics. 2021. P. 135-138.

Э.С. СЕКТАРОВ^{1,2}, В.С. СЕДОВ³, К.Н. БОЛДЫРЕВ¹

¹*Институт спектроскопии РАН, Троицк*

²*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Москва*

³*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ КАК СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ ЗАРЯДОВЫМ СОСТОЯНИЕМ ЦЕНТРОВ ОКРАСКИ В АЛМАЗАХ

В работе представлены исследования по изучению рентгеновского излучения как способ управления зарядовым состоянием центров окраски в алмазах. Было исследовано воздействие излучения на зарядовые состояния азот - (NV), кремний - (SiV), германий - вакансионных (GeV) центров окраски в алмазе. В ходе проведённых экспериментов, было выявлено изменение интенсивностей линий поглощения образцов после их облучения, что указывает на изменение зарядовых состояний центров и возможность их управления.

E.S. SEKTAROV^{1,2}, V.S. SEDOV³, K.N. BOLDYREV¹

¹*Institute for Spectroscopy of the RAS, Troitsk*

²*National Research University «Higher School of Economics», Moscow*

³*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*

X-RAY AS A METHOD FOR MANIPULATION OF COLOR CENTERS CHARGE STATE IN DIAMONDS

The paper presents research the study of X-ray radiation as the control of color centers charge state in diamonds. The effect of radiation on the charge states of nitrogen - (NV), silicon - (SiV), germanium - vacancy (GeV) color centers in diamond was investigated. In the experiments, a change of the samples absorption lines intensities after their irradiation was revealed, which indicates a change in the charge states of the centers and the possibility of their control.

Кристаллы с центрами окраски обширно используются в различных областях промышленности и науки. Они могут применяться для оптической квантовой памяти, квантовой сенсорики и квантовой криптографии. Центры окраски – это дефект кристаллической решётки, который поглощает и/или излучает в диапазоне длин волн вне области собственного поглощения кристалла. В данной работе были исследованы зарядовые состояния центров окраски в алмазе, такие как азот - (NV),

кремний - (SiV), германий - вакансионные (GeV) центры, после их облучения рентгеновским излучением.

Исследования центров окраски под воздействием рентгеновского излучения проводились на фурье-спектрометре высокого разрешения Bruker IFS 125HR с криогенной приставкой на базе рентгеновской трубки БСВ-30 с медным анодом, с номинальной мощностью 500 Вт и характеристическим излучением Cu K α 8027 эВ. Результатами исследований стали спектры поглощения полученные при температуре 5 К. Они дают хорошо разрешённую структуру линий в спектрах, что позволяет количественно оценить концентрацию центров окраски.

Полученные спектры показывают, что после воздействия рентгеновского излучения происходит изменение интенсивностей линий поглощения на длинах волн 946 нм (SiV⁰), 737 нм (SiV⁻), 575 нм (NV⁰), 637 нм (NV⁻) и 602 нм (GeV), соответствующие центрам окраски. В образце с GeV также наблюдалось появление новых линий, которые могут быть связаны с GeV⁰ и/или GeV⁺-центрами. Также замечено изменение SiV и NV-центров, рост концентрации SiV⁰ пропорционален уменьшению SiV⁻. Между NV⁰ и NV наблюдается более сложное взаимодействие, так как в процессе могут быть задействованы другие зарядовые состояния, такие как NV⁺, NV²⁺ или неизвестные состояния, так как было также обнаружено появление новых линий после облучения.

Для образцов с NV и SiV были рассчитаны изменения концентраций дефектов x по формуле (1) из работы [1]. Калибровочные коэффициенты k_{zpl} приведены в работах [1] для SiV и [2] для NV, интегральная интенсивность I_{zpl} линий поглощения рассчитывалась при помощи ПО OPUS.

$$I_{zpl} = k_{zpl} * x. \quad (1)$$

В ходе данной работы было показано, что при помощи рентгеновского излучения возможно управление зарядовыми состояниями центров окраски в алмазах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (синтез и обработка образцов – грант № 21-72-10153, спектроскопические исследования – грант № 19-72-10132).

Список литературы

1. D'Haenens-Johansson U.F.S., et al. // Phys. Rev. B. 2010. V. 82. P. 155205.
2. Davies G. // PhysicaB: Condens. Matter. 1999. V. 273. P. 15.

А.А. БОЛОШКО, В.С. РЫМКЕВИЧ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ВЛИЯНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ МИШЕНИ НА ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННУЮ ОБРАБОТКУ СТЕКЛА МИКРОПЛАЗМОЙ

В данной работе было исследовано влияния характеристик поверхности материала графитовой мишени, таких как шероховатость и пористость, на микрогеометрию структур обработанной лазерно-индуцированной микроплазмой поверхности плавленого кварца. Полученные результаты показывают возможность управления конечной шероховатостью структур на образце выбором мишени с определённой шероховатостью.

A.A. BOLOSHKO, V.S. RYMKEVICH
ITMO University, Saint-Petersburg

TARGET ROUGHNESS AFFECTION ON LASER INDUCED MICROPLASMA GLASS TREATMENT

We investigated the graphite target surface characteristics influence, such as roughness and porosity, on the surface microgeometry of the structures on fused silica sample treated by laser-induced microplasma. The results of this work shows that structures roughness on sample can be controlled by choosing target with right roughness.

Методы обработки поверхности стекла с использованием лазерно-индуцированной микроплазмы актуальны при изготовлении микрооптических элементов, основанных на модификации микрорельефа поверхности, получили широкое распространение благодаря простоте своей реализации и низкой стоимости [1, 2], однако существенной проблемой является качество обработки поверхности и разрешающая способность метода. В настоящее время, в области лазерно-индуцированных технологий основной упор в исследованиях ставится на зависимости глубины формируемых структур на поверхности стекла, от режимов лазерной обработки [3, 4]. Материалы, используемые в качестве мишени, рассматриваются только со стороны теплофизических и оптических свойств. Однако на распространение плазменного факела так же могут оказывать влияние характеристики поверхности материала мишени, такие как шероховатость и пористость.

Целью работы являлось изучение влияния характеристик рельефа поверхности графитовой мишени на результат обработки кварцевого стекла лазерно-индуцированной микроплазмой. Проведено исследование графитовых мишеней с плотностью 1.65 г/см^3 , шероховатость которых задавалась с помощью шлифовки и полировки.

Использование различных графитовых мишеней с заранее известными параметрами шероховатости из двух партий, отличающихся пористостью, показывает, что их шероховатость и пористость оказывает значительное влияние на результат обработки ЛИМП поверхности плавленого кварца. Так при одинаковых параметрах шероховатости мишени мы можем наблюдать различные результаты на плавленом кварце в зависимости от пористости мишени (рис. 1), а варьируя только шероховатость образца возможно изменение шероховатости структур на образце.

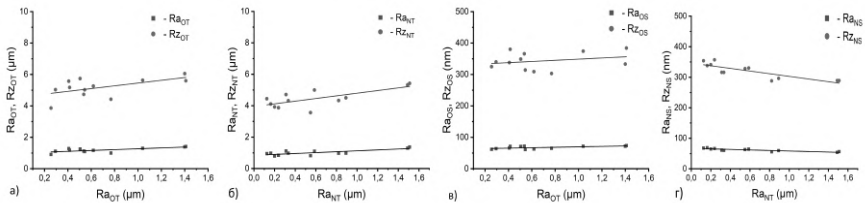


Рис. 1. Зависимость шероховатостей R_z и R_a ячеек в графитовых мишенях с меньшей пористостью (а); с большей пористостью (б); образце, обработанном от мишени с меньшей пористостью (в); с большей пористостью (г) от базовой шероховатости мишени R_a

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта НИРМА ФТ МФ Университета ИТМО.

Список литературы

1. Gresko V., Rymkevich V., Samokhvalov A., Veiko V., Sergeev M. CO₂ laser-induced microplume treatment of silicon: technique and application // Optical and Quantum Electronics. 2019. V. 51. № 12. P. 1-10.
2. Shkuratova V., Rymkevich V., Kostyuk G., Sergeev M. Laser-induced microplasma as effective tool for phase elements fabrication on amorphous and crystalline materials // Journal of Laser Micro Nanoengineering. 2018. V. 13. № 3. P. 211-215.
3. Hopp B., Vass C., Smausz T., Bor Z. Production of submicrometre fused silica gratings using laser-induced backside dry etching technique // Journal of Physics D: Applied Physics. 2006. V. 39. № 22. P. 4843.
4. Pan C., Chen K., Liu B., Ren L., Wang J., Hu Q., Liang L., Zhou J., Jiang L. Fabrication of micro-texture channel on glass by laser-induced plasma-assisted ablation and chemical corrosion for microfluidic devices // Journal of Materials Processing Technology. 2017. V. 240. P. 314-323.

Н.А. ОРЕХОВА¹, А.О. ПУХТЕЕВ¹, Р.А. ХАРИТОНЧИК¹,
А.П. ЗАЖОГИН, М.Б. ШУНДАЛОВ

Белорусский государственный университет, Минск

¹*Средняя школа № 64, Минск, Беларусь*

ПОИСК И ИНДЕФИКАЦИЯ МИКРОМЕТЕОРИТОВ ИЗ ХВОСТА КОМЕТЫ ГАЛЛЕЯ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ

Проведён отбор и сортировка частиц, собранных после прохождения Земли через метеорные потоки Эта-Аквакиды и Ориониды (хвост кометы Галлея) и определён методом лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии качественный химический состав отобранных частиц.

N.A. OREKHOVA¹, A.O. PUKHTEEV¹, R.A. CHARITONCHIK¹,
A.P. ZAJOGIN, M.B. SHUNDALOV

Belarusian State University, Minsk

¹*Secondary School No. 64, Minsk, Belarus*

SEARCH AND IDENTIFICATION OF MICROMETEORITES FROM THE TAIL OF HALLEY'S COMET BY LASER ATOMIC EMISSION SPECTROMETRY

The selection and sorting of particles collected after the passage of the Earth through the meteor streams of Eta-Aquarids and Orionids (the tail of Halley's comet) was carried out and the qualitative chemical composition of the selected particles was determined by laser atomic emission spectrometry.

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, поэтому изучение любого метеорита расширяет наши знания в этом направлении [1 - 4]. Микрометеориты являются объектами внеземного происхождения, которые встречаются на Земле повсеместно, так как наша планета движется в пространстве, заполненном мелкими метеорными телами (космической пылью).

Прохождение Земли через относительно плотные рои метеорных частиц, движущихся по орбитам разрушившихся или разрушающихся комет и астероидов, сопровождается явлением метеорного (звездного) дождя. Орбиты родительских тел почти всех наиболее интенсивных

метеорных потоков пересекаются с орбитой Земли в одной точке, т. е. порождаемые этими телами потоки наблюдаются один раз в году. Однако с орбитой кометы Галлея орбита Земли пересекается дважды: весной и осенью [4]. В это время Земля проходит сквозь шлейф частиц, оставленных знаменитой кометой.

Весной радиант метеорного потока находится в созвездии Водолея и максимальное число влетающих в нашу атмосферу частиц приходится на 5 - 6 мая. Это поток Эта-Аквариды (η -Аквариды). Осенью радиант находится в созвездии Ориона и мы наблюдаем метеорный поток Орионид (максимум потока – 21 - 22 октября). Следует отметить, что в это время наша планета не проходит сквозь другие достаточно интенсивные метеорные потоки. Таким образом, существует возможность обнаружить частицы, входившие в состав потоков, являвшихся в прошлом частью кометы Галлея.

Целью настоящей работы являлись отбор и сортировка частиц, собранных после прохождения Земли через метеорные потоки Эта-Аквариды и Ориониды и определение методом лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии качественного химического состава отобранных частиц. Выделение частиц, потенциально принадлежащих именно потокам Эта-Аквариды и Ориониды, т.е. являвшиеся в прошлом частью кометы Галлея проводили методом лазерной многоканальной спектроскопии, используя 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, количество импульсов – 20. Из материала, собранного в мае, для изучения было отобрано 18 частиц, а из материала, собранного в ноябре – 26 частиц. Проведя спектральный анализ, выделили 12 частиц сходного химического состава. В состав 6 частиц входят: кальций, железо, алюминий, кремний, марганец, цинк. Ещё ряд частиц (4 + 2) имели близкий химический состав.

Список литературы

1. Бахтин А.И., Ескин А.А., Сунгатуллин Р.Х. и др. // Ученые записки Казан. ун-та. Сер. Естественные науки. 2018. Т. 160. Кн. 2. С. 324-338.
2. Лаврентьева З.А., Люль А.Ю., Колесов Г.М. // Геохимия. 2012. № 1. С. 38-47.
3. Иванов А.В., Ярошевский А.А., Иванова М.А. Минералы метеоритов – новый каталог // Геохимия. 2019. Т. 64. № 8. С. 869-932.
4. Марочник Л.С. Свидание с кометой. М.: Терра, 2008.

А.Э. АКМАЛОВ, Г.Е. КОТКОВСКИЙ, Ю.А. КУЗИЩИН,
И.Л. МАРТЫНОВ, Е.В. ОСИПОВ, А.А. ЧИСТЯКОВ,
И.Ю. ПОПОВА, А.П. ТКАЧУК¹, Б.И. ВЕРДИЕВ¹, А.Г. АЛАТЫРЕВ¹

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

*¹Национальный исследовательский центр эпидемиологии и микробиологии
им. Н.Ф. Гамалеи, Москва*

СПЕКТРАЛЬНОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ В ГАЗОВОМ ПРОТОЧНОМ ОПТИЧЕСКОМ ЦИТОМЕТРЕ

В данной работе рассматривается возможность улучшения спектрального разделения частиц аэрозоля в газовом поточном оптическом цитометре путём анализа времени пролёта частиц через анализируемый объём. Была исследована экспериментальная зависимость времени пролёта от типа анализируемых частиц и выявлена зависимость между временем пролёта и люминесцентными свойствами частиц биоаэрозоля.

A.E. AKMALOV, G.E. KOTKOVSKIY, Yu.A. KUZISHCHIN,
I.L. MARTYNOV, E.V. OSIPOV, A.A. CHISTYAKOV, I.Yu. POPOVA,
A.P. TKACHUK¹, B.I. VERDIEV¹, A.G. ALATYREV¹

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

*¹National Research Center for Epidemiology and Microbiology
named after the honorary academician N.F. Gamaleya*

SPECTRAL SEPARATION OF AEROSOL PARTICLES IN A GAS FLOW OPTICAL CYTOMETER

The possibility of improving spectral separation of aerosols in a gas flow optical cytometry by transit time analysis is discussed. The experimental dependence of the transit time on the type of analyze particles is investigated. The dependence between the transit time and the luminescent properties of bioaerosol particles is shown.

Проточно оптический метод (ПОМ), в настоящее время, является мощным аналитическим инструментом для биологических исследований [1]. Вместе с тем, в работах [2, 3] показана перспективность данного метода для детекции и анализа аэрозольных и биоаэрозольных частиц в окружающем воздухе в режиме реального времени. К основному недостатку данного подхода можно отнести низкую селективность применительно к анализу биоаэрозольных частиц из воздуха.

В основе метода лежит воздействие УФ-источником на каждую отдельную частицу из анализируемого воздушного потока и регистрация отклика в виде флуоресценции и упругого рассеяния света. Сигналы рассеяния и флуоресценции каждой частицы попадают в систему регистрации, где разделяются по спектральным диапазонам.

В данной работе проводились исследования возможности улучшения селективности метода применительно к аэрозольным частицам в воздухе путём анализа времени пролёта аэрозольных частиц через анализируемый объём.

Эксперимент проводился на воздушном проточном оптическом цитометре со светодиодным источником возбуждения, имеющим длину волны 280 нм. Экспериментальная установка была оснащена четырьмя спектральными каналами регистрации с фотодетекторами на основе фотоэлектронных умножителей, работающих в режиме счёта фотонов.

Было проведено экспериментальное исследование спектральных характеристик аэрозольных частиц в зависимости от времени пролёта каждой зарегистрированной частицы. В эксперименте были проанализированы разные классы веществ: как содержащие основные биофлуорофоры, такие как триптофан и NADH, так и не содержащие их.

Была выявлена зависимость между фотолюминесцентными свойствами, а именно мощностью рассеяния и люминесценции, и временем пролёта частиц. Было показано, что фильтрация по времени пролёта анализируемых частиц может существенно уменьшить дисперсию сигнала на гистограммах рассеяния / люминесценции и, тем самым, улучшить селективность подхода.

Таким образом, анализ времени пролёта частиц может быть использован как в качестве дополнительного способа повышения избирательности и разделяющей способности метода, так и в качестве дополнительного канала информации о видовой принадлежности аэрозольных частиц.

Список литературы

1. Vembadi A., Menachery A., Qasaimeh M.A. Cell cytometry: review and perspective on biotechnological advances // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2019. V. 7.
2. Negron A., et al. Using flow cytometry and light-induced fluorescence to characterize the variability and characteristics of bioaerosols in springtime in Metro Atlanta, Georgia // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2020. V. 20. No. 3. P. 1817-1838.
3. Pan Y.-L. Detection and characterization of biological and other organic-carbon aerosol particles in atmosphere using fluorescence // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2015. V. 150. P. 12-35.

С.Н. ЛЕТУТА, Д.В. ДОРОФЕЕВ, А.В. ДОРОШКЕВИЧ,
А.Т. ИШЕМГУЛОВ, Д.Е. ЦЮРКО

Оренбургский государственный университет

НАБЛЮДЕНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН ПРИ ФОТОИНАКТИВАЦИИ БАКТЕРИЙ В РАСТВОРАХ

Приводятся результаты наблюдения ударных волн, возникающих в растворах с бактериями в присутствии молекулярных сенситизаторов при импульсном возбуждении. Ударные волны наблюдаются как кратковременные возмущения интенсивности зондирующего луча света, пересекающего кювету с раствором на разном расстоянии от области возбуждения.

S.N. LETUTA, D.V. DOROFEEV, A.V. DOROSHKEVICH,
A.T. ISHEMGULOV, D.E. TSYURKO

Orenburg State University

OBSERVATION OF SHOCK WAVES DURING BACTERIAL PHOTOINACTIVATION IN SOLUTIONS

We present the results of observation of shock waves in planktonic bacteria solutions with molecular sensitizers under pulsed excitation. Shock waves are observed as short-term perturbations in the intensity of the probing light beam crossing the cuvette at different distances from the excitation focus.

Фотоинаktivация является одним из перспективных методов уничтожения микроорганизмов, альтернативных традиционным антибиотикам. Понимание механизмов клеточной гибели при световом облучении позволит значительно увеличить эффективность метода. В настоящей работе представлены исследования повреждения бактерий *Salmonella typhimurium* ударными волнами в растворах с молекулярными сенситизаторами – эритрозином и родамином С. Экспериментальная установка изображена на рис. 1. Растворы помещались в прямоугольную кювету 1. Источником возбуждения служил импульсный YAG:Nd лазер 2 (вторая гармоника $\lambda = 532$ нм, длительность импульса 15 нс). С помощью цилиндрической собирающей линзы 3 внутри кюветы создавалась протяжённая зона возбуждения. Плотность мощности возбуждения максимальна в перетяжке. Перпендикулярно через кювету (и параллельно перетяжке) пропусклся тонкий луч He-Ne лазера 4, интенсивность которого во времени фиксировалась приёмником 5.

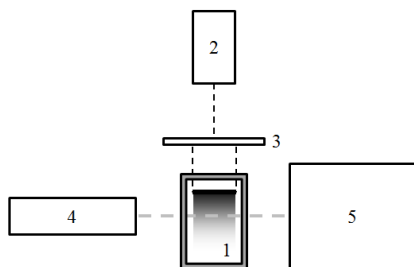


Рис. 1. Экспериментальная установка:

1 – кювета, 2 – лазер, 3 – линза,
4 – лазер, 5 – фотоприёмник

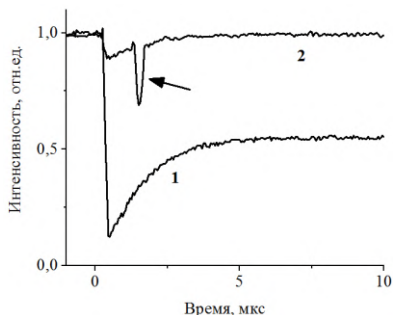


Рис. 2. Кривые пропускания зондирующего пучка лазера после импульсного возбуждения: в зоне (1) и на удалении (2) от перетяжки

Ударные волны возникают в результате теплового расширения среды после быстрого локального нагрева при безызлучательной релаксации возбуждённых состояний сенсibilизатора. Если температура превышает порог кипения, то ударные волны генерируются возникающими пузырьками пара [1]. На рис.2 показаны кинетические кривые пропускания зондирующего пучка He-Ne лазера после импульсного возбуждения. В зоне перетяжки (кривая 1) после импульса наблюдается ступенчатое уменьшение интенсивности проходящего света, которое, вероятно, обусловлено рассеянием на пузырьках пара. На удалении от перетяжки (кривая 2) изменение интенсивности после импульса меньше, однако появляются острые провалы (показано стрелкой). По-видимому, они соответствуют моментам пересечения зондирующего луча фронтом ударной акустической волны. Косвенным доказательством этого служит соответствие измеренной экспериментально скорости распространения волны скорости звука в воде.

Оценка жизнеспособности бактерий в различных зонах раствора (путём высевания проб и подсчёта колониеобразующих единиц) показала, что инактивация бактерий происходит как в фотической зоне, так и за её пределами. Это свидетельствует о том, что ударные волны являются значимым механизмом гибели бактерий в растворах с сенсibilизаторами при импульсном возбуждении. Полученные результаты могут быть полезны при разработке новых методов бактериальной инактивации.

Список литературы

1. Letuta S.N., Pashkevich S.N., Ishemgulov A.T., Nikiyan A.N. // Russian Journal of Physical Chemistry A. 2021. V. 95. No. 4. P. 848-854.

А.И. ЛОБАНОВ, М.С. КОПЬЕВА^{1,2}, С.А. ФИЛАТОВА²,
А.И. ТРИКШЕВ², Я.Э. САДОВНИКОВА, В.А. КАМЫНИН²

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

¹*Российский университет дружбы народов, Москва*

²*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОГО ОПТИЧЕСКОГО СТЕНДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДИНАМИКИ НАСЫЩЕНИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ

Создан универсальный стенд для измерения динамики насыщения поглощения оптических поглотителей. Представленная установка позволяет проводить измерения в реальном времени, а также регулировать тепловую нагрузку на образец изменением скважности и частоты импульсов сложной формы.

A.I. LOBANOV, M.S. KOPYEVA^{1,2}, S.A. FILATOVA²,
A.I. TRIKSHEV², Ya.E. SADOVNIKOVA, V.A. KAMYNIN²

MIREA – Russian Technological University, Moscow

¹*Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow*

²*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*

DEVELOPMENT OF A UNIVERSAL OPTICAL STAND FOR MEASURING THE ABSORPTION SATURATION DYNAMICS OF OPTICAL ABSORBERS

A universal stand for measuring the saturation absorption dynamics of optical absorbers has been created. The presented setup allows to carry out real-time measurements, as well as adjusting the heat load on the sample by changing the duty cycle and frequency of complex pulses.

Интерес к изучению динамики насыщения поглощения оптических затворов обусловлен их активным использованием в качестве насыщающихся поглотителей для реализации режима синхронизации мод или модуляции добротности [1, 2]. Зависимость параметров излучения от свойств насыщающегося поглотителя делает этот компонент одним из ключевых элементов импульсных лазерных систем. В последнее время было открыто множество насыщающихся поглотителей, обладающих различными порогами разрушения, пропускными характеристиками и временами релаксации, что усложняет задачу измерения их оптических свойств. Поэтому универсальный стенд для измерения насыщения

поглощения, в котором можно учесть особенности того или иного материала, поможет облегчить и ускорить процесс измерений.

На рис. 1а представлена схема стенда. Лазерный источник представлял собой импульсный лазер, работающий в режиме синхронизации мод. Осциллограмма лазерных импульсов приведена на рис. 1б (красный, ①). Излучение источника поступало на ответвитель, который использовался для разделения лазерного излучения на два канала. Один канал (10 %) использовался как тактирующий для генератора электрического сигнала, для его синхронизации. Излучение второго канала (90 %) поступало в акустооптический модулятор (АОМ). Электрический импульс с генератора представлял собой ступенчатый импульс (рис. 1б, синий, ②), причём каждая ступень перекрывала один импульс. Такая форма обеспечивала линейный характер увеличения интенсивности импульсов лазера. Импульс от генератора подавался на блок управления АОМ, который соответственно электрическому сигналу модулировал проходящее лазерное излучение второго канала. Далее модулированный сигнал делился на два канала с одинаковой средней мощностью: опорный и тестовый. Излучение опорного канала анализировалось с помощью фотоприёмника в связке с осциллографом, а излучение тестового канала проходило через образец и попадало на второй фотоприёмник. Ввиду свойств насыщающегося поглотителя, линейно промодулированный сигнал будет искажаться при прохождении образца. По отношению двух сигналов с опорного и тестового каналов, можно получить характеристику нелинейного пропускания насыщающегося поглотителя. Опираясь на скважность импульсов и частотой импульсов сложной формы, можно регулировать тепловую нагрузку на исследуемые образцы.

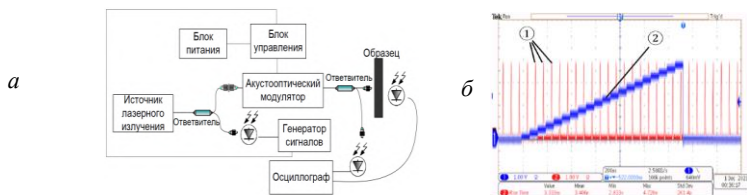


Рис. 1. Схема стенда (а); сигнал с генератора (синий, ②), осциллограмма импульсов лазерного источника (красный, ①) (б)

Список литературы

1. Jiang T., et. al. Ultrafast fiber lasers mode-locked by two-dimensional materials: review and prospect // Photonics Research. 2020. V. 1 (8). P. 78.
2. Ma C., et. al. Recent progress in ultrafast lasers based on 2D materials as a saturable absorber // Applied Physics Reviews. 2019. V. 4 (6).

А.А. СКРЫБЫКИНА^{1,2}, В.В. КОСТРОМЫКИНА^{1,2},
Г.С. РОГОЖНИКОВ²

¹*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (филиал),
Саров, Нижегородская обл.*

²*РФЯЦ – Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики, Саров, Нижегородская обл.*

ИССЛЕДОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МОДЕЛЬНЫМИ СРЕДАМИ В ИНТЕРЕСАХ СОЗДАНИЯ КОМПЛЕКСА ОПТИЧЕСКОЙ БИОПСИИ

Проведены экспериментальные исследования по верификации математической модели рассеяния широкополосного оптического излучения в биологических тканях с использованием калибровочных и модельных сред.

A.A. SKRYBYKINA^{1,2}, V.V. KOSTROMYKINA^{1,2},
G.S. ROGOZHNIKOV²

¹*Sarov branch of Lomonosov Moscow State University, Nizhny Novgorod region*

²*All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Nizhny Novgorod region*

RESEARCH OF BROADBAND OPTICAL RADIATION SCATTERING BY MODEL MEDIA WITHIN DEVELOPMENT OF OPTICAL BIOPSY COMPLEX

Experimental research concerning verification of mathematical model of broadband optical radiation scattering in biological tissues has been carried out with the usage of calibration and model media.

В РФЯЦ-ВНИИЭФ разрабатывается комплекс для диагностики онкологических заболеваний, основанный на анализе спектров рассеяния и поглощения широкополосного оптического излучения биологическими тканями *in vivo* и *in vitro*. Комплекс состоит из аппаратной части, с помощью которой производится зондирование тканей, сбор и анализ полученной информации, и программной части, позволяющей в режиме реального времени дифференцировать типы исследуемых тканей. Способ получения спектральных данных является инвазивным. В исследуемую биологическую ткань вводится тонкая игла, внутри которой находятся оптические волокна. По одним из них широкополосное излучение

попадает в ткань, по другим рассеянное тканями излучение собирается и передаётся в устройство регистрации для дальнейшего анализа.

Для верификации математической модели, заложенной в программной части комплекса, необходимо иметь калибровочные и модельные среды, которые бы воспроизводили оптические свойства биологических тканей, являлись доступными и стабильными по составу и характеристикам.

В данной работе в качестве калибровочных сред использовались суспензии (взвеси) полистирольных калиброванных микро- и наносфер в специально подготовленной воде. Выбор сред был обусловлен характером рассеяния в них широкополосного оптического излучения – от приближенного к рэлеевскому до Ми.

Для изучения модельных сред подготовлены следующие потенциальные составляющие заменителей биологических тканей: тропоколлаген – для имитации соединительной ткани, глицерин – регулятор концентрации триглицеридов и насыщенных жирных кислот в имитаторе крови человека, гемосидерин – регулятор хроматического состава имитации крови человека, трёхвалентное железо в составе фосфатного гидроксида – регулятор хроматического состава имитации крови человека, люмирубин – регулятор хроматического состава имитации крови человека и лютеин – регулятор хроматического состава жировой ткани человека, раствор хлорида натрия для регуляции плотности.

Работа выполнена в рамках проекта ЕОТП-ЯМ-219, © Наука и инновации.

Список литературы

1. Belkov S.A., Kochemasov G.G., Lyubynskaya T.E., et. al. // Appl Phys B. 2011. V. 105. P. 641-648.
2. Рогожников Г.С., Любынская Т.Е. // X Междунар. конф. Фотоника и инф.оптика. Москва: НИЯУ МИФИ, 2020.

Н.И. НЕЧИПУРЕНКО¹, Т.А. ПРОКОПЕНКО¹,
И.Д. ПАШКОВСКАЯ¹, М.П. ПАТАПОВИЧ, А.П. ЗАЖОГИН

Белорусский государственный университет, Минск
¹РНПЦ неврологии и нейрохирургии, Минск, Беларусь

МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ЛАЭМС ВЫСОХШИХ КАПЕЛЬ ПЛАЗМЫ КРОВИ В ДИАГНОСТИКЕ ПАЦИЕНТОВ С ТИА ГОЛОВНОГО МОЗГА

Изучена морфология образцов высохшей плазмы крови больных перенесших транзиторную ишемическую атаку (ТИА) головного мозга. Выявлены структурные особенности высохших капель плазмы крови пациентов с диагнозом ТИА мозга различной степени. Получены полуколичественные результаты пространственного распределения кальция в слоях высохшей капли с использованием метода лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии для получения дополнительной информации при постановке и уточнению диагноза.

N.I. NECHIPURENKO¹, T.A. PROKOPENKO¹,
I.D. PASHKOVSKAYA¹, M.P. PATAPOVICH, A.P. ZAJOGIN

Belarusian State University, Minsk
¹RRPC of Neurology and Neurosurgery Minsk, Belarus

MORPHOLOGICAL ANALYSIS AND LAES OF DRIED BLOOD PLASMA DROPLETS IN THE DIAGNOSIS OF PATIENTS WITH TIA OF THE BRAIN

The morphology of dried blood plasma samples of patients with transient ischemic attack (TIA) of the brain was studied. The structural features of dried blood plasma droplets of patients diagnosed with brain TIA of varying degrees were revealed. Semi-quantitative results of the spatial distribution of calcium in the layers of a dried drop were obtained using the method of laser atomic emission spectrometry to obtain additional information when making and clarifying the diagnosis.

Транзиторные ишемические атаки (ТИА) в общей структуре сосудистых заболеваний головного мозга составляют, по разным данным, от 12 до 35 %. У 10 - 15 % пациентов в течение последующих трёх месяцев развивается инсульт, при этом от 1/4 до 1/2 инсультов развивается в первые несколько суток.

При различных вариантах нарушения мозгового кровообращения, в частности ТИА, высохшая капля биологической жидкости имеет отличную от здорового человека структуру. Нами изучена морфология

высохших каплей плазмы крови более двадцати пациентов с ТИА головного мозга различной степени и характером патологии. В качестве примера на рис. 1а и 1б (различные увеличения) приведена морфология центральной части высохшей через девяносто минут капли плазмы крови пациента с ТИА головного мозга.

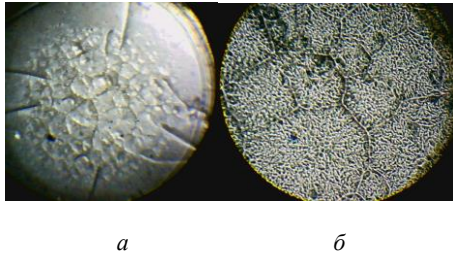


Рис. 1. Снимки центральной части, высохших каплей плазмы крови пациента

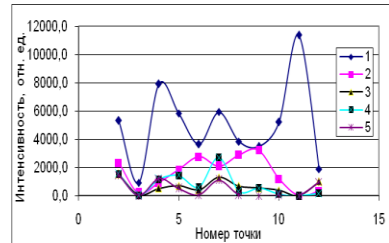


Рис. 2. Интенсивность линии Са II (393,239 нм) в атомно-эмиссионных спектрах фаций плазмы крови пациентов (в точках и слоях)

Качественный сравнительный анализ структуры поверхности образцов цельной крови показал, что у пациентов с ЦВЗ имеются различия: у пациентов с ДЭ обычно образуется радиальное растрескивание капли; при ТИА наблюдается радиальное растрескивание фации по периферии с образованием конкреций и отдельностей, а в центральном ореоле происходит расщепление на мелкие трещины. Для конкретизации патологии обследованных больных дополнительная информация получена при изучении распределения кальция по поверхности и объёму фации с использованием метода лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектрометрии (ЛАЭМС – спектрометр LSS-1).

Полученные данные (рис. 2) показывают, что у больных с ТИА в процессе высыхания каплей плазмы происходит хаотичное образование центров коагуляции, наблюдается разброс концентрации кальция как по поверхности, так и слоям. Налицо изменение связывающей способности альбумина при патологии. Это приводит к аномальной коагуляции белка и увеличению концентрации кальция по центру фации и в более глубоких слоях, как видно в слое 4, что нехарактерно для здорового человека. После проведения лечения у пациента наблюдались определённые улучшения свойств белков плазмы крови – максимальное распределение кальция передвигается на периферию капли, что ближе к качеству белков здорового человека.

Г.С. РОГОЖНИКОВ, Т.Е. ЛЮБЫНСКАЯ

РФЯЦ – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Нижегородская обл.

РЕГИСТРАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ВО ВРЕМЯ ПРОЦЕДУРЫ ПРОВЕДЕНИЯ ХИРУРГИЧЕСКОЙ (КОР И АСПИРАЦИОННОЙ) БИОПСИИ

Проведены исследования, связанные с использованием традиционных биопсийных хирургических зондов для регистрации спектров рассеяния биологических тканей и дифференцирования здоровых и поражённых тканей в режиме реального времени.

G.S. ROGOZHNIKOV, T.E. LYUBYNSKAYA

All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Nizhny Novgorod region

OPTICAL SPECTRA ACQUISITION DURING SURGICAL CORE AND ASPIRATION BIOPSY

A study has been carried out concerning the usage of traditional surgical biopsy probes for registration of scattering spectra of biological tissues and differentiation of normal and damaged tissues in real time.

Неоспоримым плюсом оптической биопсии по сравнению с хирургическими методами исследований является высокая точность определения границ повреждённого или перерождённого участка ткани (точность может быть ещё выше при одновременном использовании аппарата УЗДГ), его структуры, доступ к участкам ткани, расположенным глубоко под поверхностью кожи, окружённым жировой прослойкой, внутри паренхиматозных органов [1].

В последнее время медицинскими учреждениями проявляется интерес к комбинированию методов оптической и традиционной (хирургической) биопсии, что позволяет существенно повысить точность постановки диагноза. Данная задача является выполнимой, но содержит ряд трудностей, которые предстоит решить прежде широкого внедрения комбинированного метода. К таковым прежде всего относится конструкция биопсийного зонда. Внедрение в состав зонда оптических волокон является сложной инженерной задачей, т.к. необходимо сохранить все характеристики, присущие хирургическому биопсийному зонду изначально, и не увеличить травматичность процедуры в целом.

Во ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» разработаны прототипы двух вариантов комбинированного зонда: на основе традиционной гильотинной полуавтоматической биопсийной иглы и на основе шприца с концентрической системой игл для аспирационной биопсии.

В обоих вариантах на окончание иглы зонда по световоду поступает широкополосное (400 - 2000 нм) или квази-широкополосное (линейчатое) излучение, которое рассеивается тканями и собирается несколькими приёмными световодами. Излучение от приёмных световодов доставляется в анализатор. В случае использования анализатора разработки ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» в режиме реального времени происходит оценка характеристик тканей, результат которой выдаётся на экран монитора.

Данная работа выполнена при поддержке Научно-образовательного центра Нижегородской области «Техноплатформа 2035» в рамках соглашения № 075-10-2021-094 от 05.07.2021 г.

Список литературы

1. Турчин И.В. // УФН. 2016. Т. 186. № 5. С. 550-567.
2. Belkov S.A., Kochemasov G.G., Lyubynskaya T.E., et. al. // Appl Phys B. 2011. V. 105. P. 641-648.

И.В. ЯМИНСКИЙ, С.А. СЕНОТРУСОВА, А.И. АХМЕТОВА
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ОПТИЧЕСКАЯ МИКРОСКОПИЯ НАНОМЕТРОВОГО РАЗРЕШЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МИКРОЛИНЗ

Приведены результаты экспериментов по преодолению дифракционного предела в оптической микроскопии с помощью использования микролинз в обычном оптическом микроскопе. Рассмотрено совмещение атомно-силовой микроскопии и микролинз для исследования биологических объектов, таких как бактерии, вирусы, клетки, сети из живых нейронов.

I.V. YAMINSKY, S.A. SENOTRUSOVA, A.I. AKHMETOVA
Lomonosov Moscow State University

NANOMETER RESOLUTION OPTICAL MICROSCOPY USING MICROLENSSES

Presents the result of experiments on the overcoming the diffraction limit in optical microscopy using microlenses in an ordinary optical microscope. Reviewed a combination of atomic force microscopy and microlenses for studying biological objects such as bacteria, viruses, cells, networks of living neurons.

Разрешающая способность современных обычных оптических микроскопов ограничена дифракционным пределом. Чтобы увеличить ее, а также преодолеть данное ограничение, предлагается использовать микролинзы.

В современной оптической микроскопии существует несколько актуальных способов преодолеть ограничение, накладываемое дифракцией. Используют флуоресцентные микроскопы с введением в изучаемые объекты белковых молекул, светящихся при воздействии ультрафиолета. Однако окрашивание вирусов трудно реализовывать на практике. Также существует сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия, она позволяет получать растровые изображения с разрешением ниже дифракционного предела, однако это способ довольно медленный. Преимущество предлагаемого метода с использованием микролинз заключается в том, что с его помощью можно реализовать изучение вирусов и других биообъектов. Микролинза – оптическая линза, позволяющая получить изображение за счёт «захвата» световых волн в ближнем поле, отражённых от предмета. Располагаясь между образцом и

объективом микроскопа, микролинза является оптическим усилителем, повышающим разрешающую способность микроскопа [1].

Перспективы использования оптических микроскопов с микролинзами заключаются в достижении новых возможностей для получения изображений бактерий, вирусов, ДНК и биомакромолекул с подробным изучением их внутреннего устройства в реальном времени.

Данный метод был предложен командой исследователей под руководством Цзен Бо Вана из Массачусетского университета [2, 3]. В работе планируется применить этот метод для разработки нового способа обнаружения с предельно высокой чувствительностью биологических агентов – бактерий и вирусов – в различных средах.

Для достижения новых возможностей по наблюдению биологических объектов на воздухе и в жидкостях предложено совместить оптическую микроскопию со сканирующей зондовой микроскопией, а также с применением лазерного проекционного микроскопа, что даст возможность исследования при низкой освещённости образца. При этом возникает уникальная возможность обнаружения вирусных частиц оптическим методом в поле большого размера и последующее его изучение с помощью различных вариантов сканирующей зондовой микроскопии.

Список литературы

1. Шеппард А. Микросферный объектив – новое слово в оптической наноскопии // Наноиндустрия, 2018. Т. 11. № 3-4 (83), С. 202-206.
2. Wang Z., Guo W., Li L., Luk'yanchuk B., Khan A., Liu Z., Chen Z., Hong M. Optical virtual imaging at 50 nm lateral resolution with a white-light nanoscope // Nature communication. 2011. V. 2(1). № 218. P. 1-6.
3. Fan W., Yan B., Wang Z., Wu L. Three-dimensional all-dielectric metamaterial solid immersion lens for subwavelength imaging at visible frequencies // Science Advances. 2016. V. 2. № 8. P. 1-8.

А.Б. ФЕДОРЦОВ, М.О. СИЛИВАНОВ

Санкт-Петербургский горный университет

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА БЕРЕЖНОГО ПРОБУЖДЕНИЯ СВЕТОМ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ БИОРИТМАМИ ЧЕЛОВЕКА

Современными исследованиями офтальмологов в глазах человека был обнаружен третий, кроме палочек и колбочек, вид фоторецепторов. Эти рецепторы предназначены не для получения изображений, а в первую очередь для корректировки биоритмов, в том числе управлением процессом пробуждения. Предложена технология светового пробуждения человека, основанная на современных представлениях офтальмологии и биоритмологии. Технология использует компьютерное управление физическими факторами пробуждения – светом и звуком. Важно, что при этом возможно реализовать неограниченный индивидуальный подбор режимов пробуждения при использовании уже имеющихся в большинстве семей электронных приборов.

A.B. FEDORTSOV, M.O. SILIVANOV

Saint-Petersburg Mining University

USING METHOD OF GENTLE AWAKENING BY LIGHT TO CONTROL HUMAN BIORHYTHMS

Modern studies of ophthalmologists have discovered a third type of photoreceptors in human eyes, except for rods and cones. These receptors are not intended for obtaining images, but primarily for correcting biorhythms, including controlling the process of awakening. The technology of human light awakening based on modern concepts of ophthalmology and biorhythmology is proposed. The technology uses computer control of the physical factors of awakening – light and sound. It is important that at the same time it is possible to realize an unlimited individual selection of wake-up modes when using electronic devices already available in most families.

В 1991 году группой исследователей во главе с Р. Форстером и Л. Провансио в глазах людей обнаружен новый, третий вид фоторецепторов – ipRGC ганглиозные клетки [1, 2] которые предназначены для пробуждения человека. Эти рецепторы расположены в сетчатке глаза. Установлено [3, 4], что в отличие от фоторецепторов в виде палочек и колбочек, эти рецепторы не формируют сигналы изображения, идущие по зрительному нерву в мозг (рис. 1). Они лишь оценивают интенсивность и цвет попадающего на сетчатку света и

подстраивают суточные часы организма. Эти рецепторы предназначены не для получения изображений, а в первую очередь для корректировки биоритмов, в том числе управлением процессом пробуждения (рис. 2). По мере приближения момента восхода Солнца сокращается длина пути света в атмосфере, из-за чего изменяется цвет свечения небосклона от тёмно-фиолетового через синий до светло-голубого.

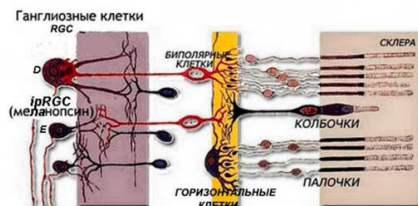


Рис. 1. Структура сетчатки глаза

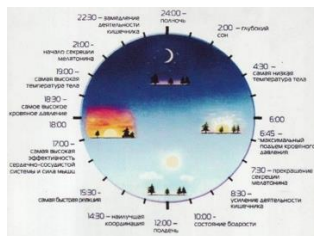


Рис. 2. Суточные (циркадные) ритмы человека при естественном освещении

На основании выше сказанного, предложено использовать, нарастающий по яркости световой сигнал будильника, который будет изменять цвет свечения от тёмно-фиолетового до светло-голубого вплоть до появления жёлтой составляющей, соответствующей моменту рассвета. Длительность и характер световых процессов пробуждения, по-видимому, должен соответствовать природным процессам, которые отличаются в зависимости от географического месторасположения.

Для решения поставленной задачи был выбран вариант использования персонального компьютера и встроенной программы «планировщик задач», т.к. в этом случае нет необходимости приобретать дополнительное оборудование и программное обеспечение. Так как в настоящее время почти в каждом доме есть стационарный компьютер или ноутбук, появляется возможность использования данного метода даже в поездках или командировках для регулирования биоритмов человека, что положительно сказывается на работоспособности и самочувствии.

Список литературы

1. Provencio I., Rodriguez I.R., et. al. // J. Neurosci. 2000. V. 20(2). P. 600.
2. Foster R.G., Provencio I., et. al. // J. Comp. Physiol [A]. 1991. V. 169(1). P. 39-50.
3. Foster R.G. // Nature. 2005. V. 433 (7027). P. 698.
4. Melyan Z., Tattelin E.E., et. al. // Nature. 2005. V. 433 (7027). P. 741.

А.С. БОБЕ^{1,2}, А.Г. КОРЕПАНОВА², А.К. СОЛОВЕЙ¹,
А.О. ВОЗНЕСЕНСКАЯ¹

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург

²ООО «Геофотоника», Санкт-Петербург

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ПЛАСТОВОГО ФЛЮИДА

Приведён алгоритм обработки данных оптического датчика анализа пластового флюида в условиях скважинного мониторинга. Определён набор используемых оптико-электронных систем для целей идентификации флюида. Представлены методы обработки сигнала.

A.S. BOBE^{1,2}, A.G. KOREPANOVA¹, A.K. SOLOVEY¹,
A.O. VOZNESENSKAYA¹

¹ITMO University, Saint-Petersburg

²Geophotonica LLC, Saint-Petersburg

DATA PROCESSING ALGORITHM IN THE OPTICAL ANALYZER DEVICE FOR DOWNHOLE FLUID IDENTIFICATION

An algorithm for processing data from an optical sensor for analyzing a formation fluid under well monitoring conditions is presented. The set of used optoelectronic systems for fluid identification has been determined. Signal processing methods are presented.

Анализ пластового флюида в скважине является важной техникой для определения характеристик и природы геологических образований, содержащих месторождения углеводородов. Типы пластового флюида, такие как жидкие углеводороды, вода, фильтрат бурового раствора обладает рядом оптических свойств, таких как спектральное поглощение, флуоресценция, показатель преломления [1]. Анализируя взаимные соотношения перечисленных характеристик, можно получить исчерпывающую информацию о составе флюида [2 - 5]. При использовании оптических методов анализа пластового флюида необходимо получать сведения, такие как: тип флюида (газ, вода, нефть) концентрации углеводородных компонент, концентрация воды, концентрация CO₂, степень загрязнения буровым раствором.

Целью работы является разработка функциональной схемы оптического датчика и формирование алгоритма обработки данных для

задач идентификации пластового флюида в условиях скважинного мониторинга. В табл. 1 представлены характерные оптические характеристики типов пластового флюида.

Таблица 1

Тип	Характерные спектральные линии поглощения	Флуоресценция	Показатель преломления
Вода	1450 нм, 1927 нм	-	1,33
Метан	1650 нм	-	1,00 - 1,30
Нефть	1692 нм, 1726 нм	500 - 650 нм	1,36 - 1,72
Буровой раствор на основе...			
нефти	1692 нм, 1726 нм	-	-
воды	1450 нм, 1927 нм	450 - 500 нм (при наличии флуоресцирующего красителя)	-
CO ₂	2007 нм, 2048 нм	-	1,00

Для получения достоверной информации о составе пластового флюида необходимо использование следующих оптических инструментов: спектрометра ИК-диапазона, флуориметр, рефрактометр. Данные каждого из инструментов необходимо обработать с целью получения характеристик пластового флюида.

1. Рефрактометр. При обработке сигнала необходимо сравнивать сигнал с калибровочными данными для показателя преломления.

2. Флуориметр. Характеристикой флуоресценции пластового флюида принято считать параметр Q [6], определяемый как отношение сигнала на длинах волн 650 и 500 нм.

3. Спектрометр. Полученные спектральные данные необходимо привести к виду оптической плотности для дальнейшего расчёта концентрации компонентов пластового флюида.

Работа выполнена в рамках НИР «Фундаментальные и прикладные вопросы фотоники» № 621317.

Список литературы

1. Бурханов Р.Н. // Ученые записки Альметьевского государственного нефтяного института. 2012. Т. 10. № 2. С. 238-248.
2. Sroka S., Cartellieri A., Schaefer P. Patent US20100025112A1. 2010.
3. Mullins O.C., Pomerantz A.E., et. al. // Annu. Rev. Chem. Biomol. 2014. V. 5. P. 325-345.
4. Di Foggio R., Climent H.C. Patent US20200291777A1. 2020.
5. Mullins O.C., Terabayashi T., Kegasawa K., Okuda I., Fanai N. // Optical Methods for Industrial Processes. 2001. V. 4201. P. 73-81.
6. Ryder A.G. // Reviews in Fluorescence. Boston: Springer, 2005. https://doi.org/10.1007/0-387-23690-2_8.

О.С. КАБАНОВА, И.И. РУШНОВА, Е.А. МЕЛЬНИКОВА,
А.Л. ТОЛСТИК

Белорусский государственный университет, Минск

ДИФРАКЦИОННЫЕ ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРИЗУЕМОГО ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА

Предложен метод создания пространственно структурированных анизотропных оптических элементов на основе полимеризуемого жидкого кристалла. Метод основан на технологии текстурированной фотоориентации с использованием компьютерно-синтезированной маски. Продемонстрирована возможность создания анизотропной дифракционной структуры, обеспечивающей формирование сингулярных световых пучков с заданными топологическими зарядами.

O.S. KABANOVA, I.I. RUSHNOVA, E.A. MELNIKOVA,
A.L. TOLSTIK

Belarusian State University, Minsk

DIFFRACTIVE TOPOLOGICAL ELEMENTS BASED ON POLYMERIZABLE LIQUID CRYSTAL

A method for creating spatially structured anisotropic optical elements based on polymerizable liquid crystal is proposed. The method is based on the technology of textured photo-alignment using a computer-synthesized mask. An anisotropic diffraction structure providing the formation of singular light beams with adjusted topological charges is demonstrated.

В последнее время активно разрабатываются новые методы и технологии формирования сингулярных световых пучков, которые нашли практические приложения при решении разнообразных научных и технических задач: оптическое манипулирование микрообъектами, лазерная обработка материалов, визуализация микрообъектов с высоким пространственным разрешением, криптография и др [1 - 3]. Одним из способов формирования сингулярных световых пучков является использование дифракционных оптических элементов. Для их создания применяются два метода – цифровой, основанный на решении обратной задачи дифракции [4, 5] и аналоговый с использованием голографической записи [5, 6].

В настоящей работе предложен компьютерно-синтезированный метод создания топологического дифракционного элемента, основанный на технологии текстурированной фотоориентации полимеризуемого жидкого кристалла (ПЖК) [7, 8]. Ориентация директора ПЖК задавалась посредством двойного экспонирования фотоориентирующего покрытия (азокраситель Ata-2 [8, 9]) через амплитудную маску, профиль которой соответствовал рассчитанной картине интерференции плоской волны с когерентным вихревым пучком и заданным топологическим зарядом. Созданная на основе предложенной технологии дифракционная структура представляет собой чередование доменов ориентации молекул ПЖК с ортогональным направлением директора.

На рис. 1 представлена картина дифракции излучения гелий-неонового лазера ($\lambda = 632,8$ нм) на изготовленном топологическом ПЖК-элементе, а также анализ фазовой топологии светового пучка в направлении первого порядка дифракции, проведённый методом его когерентного сложения с плоской и сферической волнами.

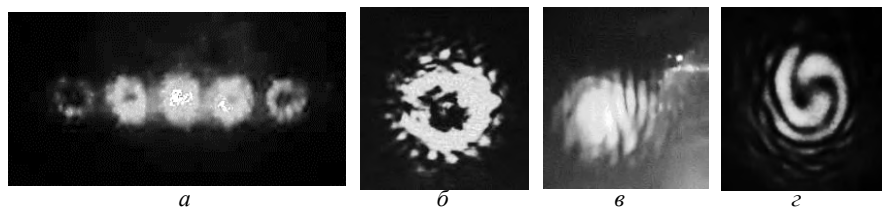


Рис. 1. Дифракционная картина (а), профиль распределения интенсивности (б), картины интерференции сингулярного пучка с плоской (в) и сферической (г) волнами

Список литературы

1. Leitz G., Fällman E., Tuck S., Axner O. // Biophys. J. 2002. V. 82 (4). P. 2224-2231.
2. Wang J., Yang J.-Y., et al. // Nature Photonics. 2012. V. 6. P. 488-496.
3. Yang L., Qian D., et al. // Appl. Phys. Lett. 2017. V. 110. P. 221103.
4. Heckenberg N.R., McDuff R., Smith C.P., White A.G. // Opt. Lett. 1992. V. 17. P. 221-223.
5. Melnikova E.A., Kurapov J.D., Romanov O.G., Tolstik A.L. // Proc. of 11-th International conference "HoloExpo'2014". 2014. P. 99-104.
6. Levenson M.D., Ebihara T., et al. // J. Microlith., Microfab., Microsys. 2004. V. 3 (2). P. 293-304.
7. Mikulich V.S., Murauski An.A., Muravsky Al.A., Agabekov V.E. // Appl. Spectr. 2016. V. 83 (1). P. 115-120.
8. Кабанова О.С., Рушнова И.И. и др. // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. 2019. № 3. С. 4-11.
9. Rushnova I.I., Kabanova O.S., Melnikova E.A., Tolstik A.L. // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. 2018. V. 21 (3). P. 206-219.

А.В. ХОМЧЕНКО, И.У. ПРИМАК
Белорусско-Российский университет, Могилёв

ИЗМЕРЕНИЕ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЯ В ЖК-ПЛЁНКАХ

Рассмотрен волноводный метод определения двулучепреломления в анизотропном слое полимеризованного жидкого кристалла. Метод основан на регистрации и обработке пространственного распределения интенсивности светового пучка, отражённого от призматического устройства связи при возбуждении волноводной моды в тонкоплёночной структуре.

A.V. KHOMCHENKO, I.U. PRIMAK
Belarusian-Russian University, Mogilev

MEASURING BIREFRINGENCE IN LC-FILMS

A waveguide technique of the anisotropic LC-film birefringence determination is considered. It's based on recording and processing the intensity distribution of the light beam reflected from a prism coupler in case exciting a guided mode in thin-film structure.

Измерение двулучепреломления анизотропных сред представляет определённый интерес в случае использования неоднородных анизотропных материалов, примерами которых могут служить плёнки полимеризованных жидких кристаллов (рис. 1). С этой точки зрения методы волноводной спектроскопии могут оказаться эффективными для исследования свойств таких структур [1]. В сообщении представлены результаты развития данного подхода для случая анизотропного слоя на изотропной подложке. Ориентация оптической оси в слое задаётся вектором $\mathbf{c} = (\sin \theta_c \sin \alpha_c, \cos \theta_c, \sin \theta_c \cos \alpha_c)$. Плоскость падения и отражения света можно расположить так, что по отношению к ней $\alpha = 0$. Если систему координат связать с этой плоскостью (X - поперечная, Y - продольная координаты), то компоненты тензора диэлектрической проницаемости ЖК-плёнки можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \varepsilon_o, & \varepsilon_{yy} &= \varepsilon_o + \Delta\varepsilon \cos^2 \theta_c, & \varepsilon_{zz} &= \varepsilon_o + \Delta\varepsilon \sin^2 \theta_c, & \varepsilon_{xz} &= \varepsilon_{zx} = 0 \\ \varepsilon_{yz} &= \varepsilon_{zy} = \Delta\varepsilon \sin \theta_c \cos \theta_c, & \varepsilon_{xy} &= \varepsilon_{yx} = 0, & \Delta\varepsilon &= \varepsilon_l - \varepsilon_o \end{aligned}$$

и сформулировать дисперсионные уравнения для ТЕ- и ТМ-мод.

На рис. 1а представлены результаты решения таких дисперсионных уравнений для различных мод слоя жидкого кристалла на ТАЦ-подложке при ориентации оптической оси перпендикулярно плоскости XY.

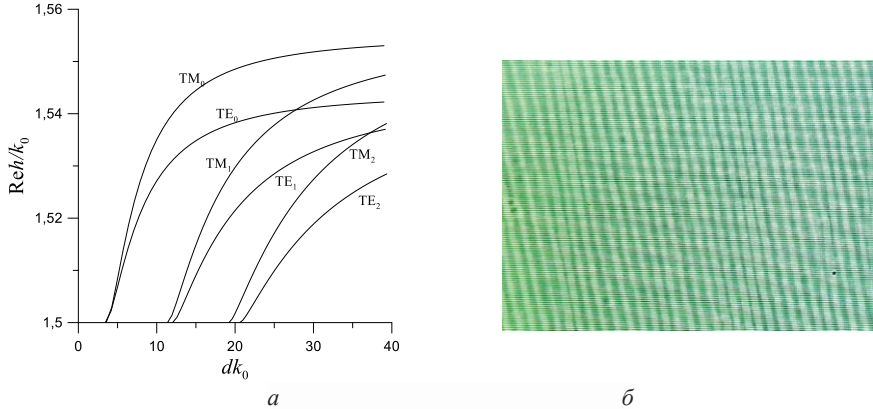


Рис. 1. Зависимости постоянной распространения моды (а) от толщины слоя жидкого кристалла и его изображение в поляризованном свете (б)

Как видно, анизотропия существенно влияет на постоянную распространения мод ТМ-поляризации. Это позволяет определить параметры анизотропного слоя на основе измерения действительных постоянных распространения мод ТЕ- и ТМ-поляризации на основе минимизации функционала

$$I(\epsilon_o, \Delta\epsilon, d) = \sum_{p=0}^1 \sum_{m=0}^n \left(Re h_{p,m}^e - Re h_{p,m}^t(\epsilon_o, \Delta\epsilon, d) \right)^2,$$

где $Re h_{p,m}^e$ – измеренные действительные части постоянной распространения при заданных номере m и поляризации моды p ($p = 1, 2$), $Re h_{p,m}^t(\epsilon_o, \Delta\epsilon, d)$ – рассчитанные значения постоянных распространения мод на основе дисперсионных уравнений для заданных параметров анизотропии. Исследованы возможности этого подхода для восстановления параметров анизотропных слоёв. Величина двулучепреломления измерена также независимым методом поляризационной интерферометрии. Получена удовлетворительная корреляция результатов.

Список литературы

1. Khomchenko A.V. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. 2016. V. 80. № 4. P. 426-430.

Б.И. МАХСУДОВ, И.Х. ФАЙЗУЛЛОЕВ

Таджикский национальный университет, Душанбе

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С КОМПОЗИТАМИ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕР – НЕМАТИЧЕСКИЙ ЖИДКИЙ КРИСТАЛЛ ПРИ ОДНООСНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Исследованы оптические свойства полимерно-жидкокристаллических композитов с управляемым поверхностным сцеплением при одноосной деформации. Экспериментально показано, что в полимерно-жидкокристаллических композитах на основе нематического жидкого кристалла 4-*n*-гептил-4-цианобифенил (7CB) можно наблюдать явление оптического гистерезиса при одноосной деформации. Результаты данной работы могут быть применены как элемент статической памяти для записи и длительного хранения информации и переключателей бистабильных состояний.

B.I. MAKHSUDOV, I.Kh. FAYZULLOYEV

Tajik National University, Dushanbe, Republic of Tajikistan

NONLINEAR PHENOMENA IN THE INTERACTION OF LASER RADIATION WITH COMPOSITES BASED ON POLYMER - NEMATIC LIQUID CRYSTAL UNDER UNIAXIAL DEFORMATION

The optical properties of polymer-liquid crystal composites with controlled surface adhesion under uniaxial deformation have been investigated. It has been shown experimentally that in polymer - liquid crystal composites based on a nematic liquid crystal 4-cyano-4N-heptylbiphenyl (7CB), the phenomenon of optical hysteresis can be observed under uniaxial deformation. The results of this work can be applied as an element of static memory for recording and long-term storage of information, switches of bistable states.

Одним из интересных способов управления потоками фотонов является использование оптических свойств полимерно-жидкокристаллических композитов (ПЖКК) [1].

В данной работе представлены экспериментальные результаты исследования явления оптического гистерезиса в композитах полимер–нематический жидкий кристалл (НЖК) без добавок хиральной компоненты при одноосной деформации. Использована

экспериментальная установка особенностью, которого является то, что в качестве источника фотонов используется инжекционный лазер на основе напряжённых гетеронаноструктур [2].

На рис. 1 представлена зависимость проходившей оптической мощности от величины относительной деформации ПЖКК.

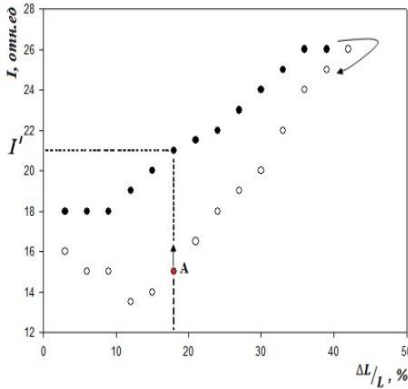


Рис. 1. Зависимость проходившей оптической мощности от величины относительной деформации ПЖКК

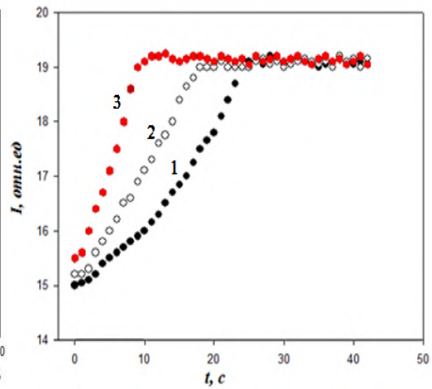


Рис. 2. Температурная зависимость проходившей оптической мощности от времени задержки в точке А рис. 1: 305 К (1); 309 К (2); 313 К (3)

Как видно из рис. 1 кривые в прямом и обратном направлении не совпадают, и наблюдается петля гистерезиса интенсивности лазерного излучения. На рис. 2 приведены результаты изменения проходившей оптической мощности в точке А рис. 1 при различных температурах. По-видимому, наблюдаемые эффекты связаны с различными характерными временами релаксации ориентации макромолекул полимера и молекул НЖК. Отметим, что при приложении электрического поля на плёнки нематических ПЖКК петли гистерезиса интенсивности лазерного излучения не наблюдается.

Список литературы

1. Melnikova E., Tolstik A., Rushnova I., et al. // Applied Optics .2015. V. 54(16). P. 5130-5135.
2. Махсудов Б.И. // Квантовая электроника. 2015. Т. 45. № 3. С. 216-217.

В.В. ГАЛУЦКИЙ, М.А. КУПЛЕВИЧ, Н.В. СТРИКИЦА,
Е.В. СТРОГАНОВА, Е.С. ШОСТАК

Кубанский государственный университет, Краснодар

ИССЛЕДОВАНИЕ СЛОИСТЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ LiNbO₃ МЕТОДАМИ ТЕРАГЕРЦОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Приведены результаты экспериментальных исследований слоистых структур на основе монокристалла LiNbO₃ с нанесённым слоем оптической керамики LiNbO₃:Er в терагерцовом (ТГц) спектральном диапазоне. Доля керамических кластеров LiNbO₃, напылённых на подложку, ориентация которых совпала с ориентацией подложки, составила 2/3 объёмных частей.

V.V. GALUTSKIY, M.A. KUPLEVICH, N.V. STRIKITSA,
E.V. STROGANOVA, E.S. SHOSTAK

Kuban State University, Krasnodar

RESEARCH OF LAYERED STRUCTURES BASED ON LiNbO₃ BY TERAHERTZ SPECTROSCOPY METHODS

The results of experimental studies of layered structures based on a LiNbO₃ single crystal with an applied layer of LiNbO₃:Er optical ceramics are presented in the THz spectral range. The proportion of LiNbO₃ ceramic clusters deposited on the substrate whose orientation coincided with the orientation of the substrate was 2/3 of the volume parts.

Возможность реализации неоднородности физических параметров и условий создания концентрационных профилей оптических примесных центров позволяют реализовать на основе керамики сложные функциональные элементы для различных сфер применения [1].

В работе исследуется слоистая структура, состоящая из монокристаллической подложки LiNbO₃ и керамического слоя на основе ниобата лития с примесью Er³⁺. Целью исследования является разработка методики оценки формирования упорядоченной структуры (ориентация поликристаллических зёрен относительно кристаллографических осей подложки) в напыляемом керамическом слое образца [2] с помощью терагерцовой спектроскопии. На рис. 1а представлена координатная зависимость импульса отражённого сигнала от пластины при спектральном сканировании в диапазоне 0,2 - 2 ТГц, полученных при помощи спектрометра Tera K-15. На рис. 1б показана координатная

зависимость отношения показателя преломления керамического покрытия Er:LiNbO_3 на частоте 0,9 ТГц к показателю преломления, определённого на части пластины LiNbO_3 без керамического напыления. Из рисунков видно, что в конфигурации X - среза распределение показателя преломления неоднородно, следовательно, кластеры LiNbO_3 находятся в состоянии с разупорядоченной структурой относительно оси X. Из принципов геометрического наложения ортогональных компонент поля можно оценить долю керамических кластеров, напылённых на подложку, ориентация которых совпала с ориентацией подложки, в случае, представленном на рисунке, она составила 2/3 объёмных частей.

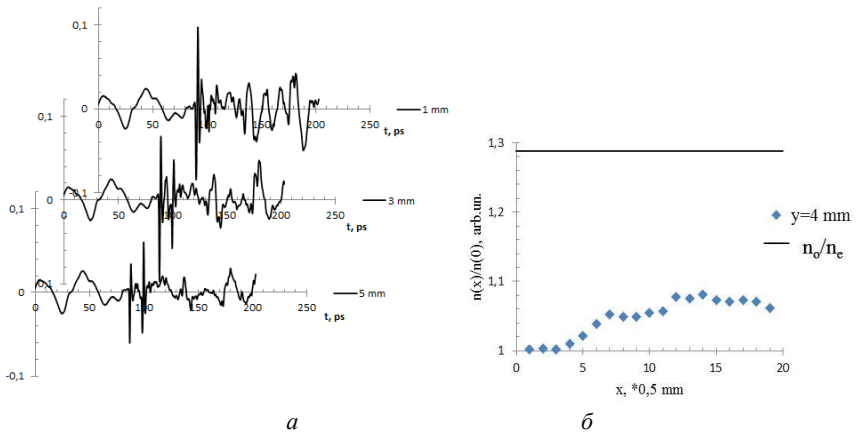


Рис. 1. Координатная зависимость импульса отражённого сигнала от пластины (а) и отношения показателей преломления Er:LiNbO_3 на частоте 0,9 ТГц (б)

Анализ спектров отражения в разработанной методике позволил сделать оценку толщины керамического слоя, которая составила порядка 200 - 300 мкм.

Список литературы

1. Багаев С.Н., Осипов В.В., Ватник С.М. Лазерные Re^{3+} :YAG-керамики: получение, оптические свойства и генерационные характеристики // Квантовая электроника. 2015. Т. 45. Вып. 5. С. 492-497.
2. Shikata J.I., et al. Tunable terahertz-wave parametric oscillators using LiNbO_3 and MgO:LiNbO_3 crystals // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2000. V. 48. № 4. P. 653-661.

М.В. СМІРНОВ, Н.В. СІДОРОВ, М.Н. ПАЛАТНИКОВ,
В.Б. ПІКУЛЕВ¹

*Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья
им. И.В. Тананаева Кольского научного центра РАН, Апатиты, Мурманская обл.*

¹Петрозаводский государственный университет

ВЛИЯНИЕ ДВОЙНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ Fe И Mg НА ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ КРИСТАЛЛА НИОБАТА ЛИТИЯ

В работе представлено исследование влияния двойного легирования (Mg^{2+} и Fe^{2+}) на фотолюминесценцию кристалла $LiNbO_3:Mg(5.15):Fe(0.005 \text{ мол. \%})$ относительно кристалла $LiNbO_{3\text{cong}}$ и $LiNbO_3:Mg(5.29 \text{ мол. \%})$.

M.V. SMIRNOV, N.V. SIDOROV, M.N. PALATNIKOV,
V.B. PIKULEV¹

*I.V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral
Raw Materials of Kola Science Center of the RAS, Apatity, Murmansk region*

¹Petrozavodsk State University

THE INFLUENCE OF Fe AND Mg DOUBLE DOPING ON LITHIUM NIOBATE CRYSTAL PHOTOLUMINESCENCE

The photoluminescence in visible range of $LiNbO_3:Mg(5.15):Fe(0.005 \text{ mol. \%})$ crystal with respect to $LiNbO_{3\text{cong}}$ and $LiNbO_3:Mg(5.29 \text{ mol. \%})$ was investigated.

Применение нелинейно-оптического кристалла ниобата лития ($LiNbO_3$) в качестве преобразователя оптического излучения ограничено эффектом фоторефракции. Его усилению в кристалле $LiNbO_3$ способствуют примесные (фоторефрактивные) ионы переходных металлов Fe, Cu и др., меняющие своё зарядовое состояние под действием лазерного излучения [1]. Нефоторефрактивные ионы Mg^{2+} , Zn^{2+} и др., наоборот, снижают эффект фоторефракции. На эффективность преобразования оптического излучения может влиять также спонтанная излучательно/безызлучательная рекомбинация с участием точечных (собственных и примесных) дефектов кристалла $LiNbO_3$, которые образуют локализованные уровни энергии в запрещённой зоне. В данной работе впервые представлено исследование фотолюминесценции кристалла $LiNbO_3:Mg(5.15):Fe(0.005 \text{ мол. \% в кристалле})$, выращенного из гомогенно-легированной шихты, полученной с использованием

прекурсора $\text{NbO}_5\text{:Mg:Fe}$, относительно кристалла LiNbO_3 конг, выращенного из расплава с 48.6 мол. % Li_2O , а также близкого по составу кристалла $\text{LiNbO}_3\text{:Mg(5.29 мол. \%)}$, полученного с использованием твердофазной лигатуры. Все кристаллы выращены методом Чохральского, методика которой представлена в [2].

Спектры фотолюминесценции ($\lambda = 380 \div 700$ нм) регистрировались с помощью спектрографа SOL SL-100M с ПЗС-детектором FLI ML 1107 BlackIlluminated (Hamamatsu). Возбуждение люминесценции осуществлялось непрерывным He-Cd лазером ($\lambda_{\text{возб}} = 325$ нм, 15 мВт).

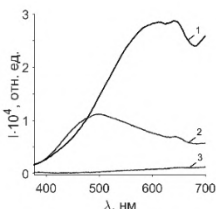


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции для исследуемых кристаллов:

1 – LiNbO_3 конг, 2 – $\text{LiNbO}_3\text{:Mg(5.29)}$,
3 – $\text{LiNbO}_3\text{:Mg(5.15):Fe(0.005 мол. \%)}$

Спектры фотолюминесценции состоят из широких полос с максимумами при 600 и 500 нм для кристаллов LiNbO_3 конг и $\text{LiNbO}_3\text{:Mg(5.29 мол. \%)}$. Важно отметить то, что в спектре кристалла $\text{LiNbO}_3\text{:Mg(5.15):Fe(0.005 мол. \%)}$ отсутствует эмиссия. Известно, что люминесценция в видимой области обусловлена точечными дефектами Nb_{Li} . В частности, Nb_{Li} формируют синглетные гайтлер-лондоновские биполяронные пары $\text{Nb}_{\text{Li}}^{4+} - \text{Nb}_{\text{Nb}}^{4+}$. Максимальное количество таких пар наблюдается в кристалле LiNbO_3 конг, в котором концентрация Nb_{Li} максимальна (1 мол. %). Легирование Mg уменьшает число таких центров ($I_1/I_2 = 2.5$, рис. 1) за счёт его изоморфного внедрения в позиции лития. Двойное легирование Fe и Mg тушит люминесценцию собственных дефектов. Катионы Fe^{2+} и дефекты Nb_{Li} являются глубокими ловушками электронов, поглощение которых находится около 500 нм. Следовательно, в кристалле $\text{LiNbO}_3\text{:Mg(5.15):Fe(0.005 мол. \%)}$ происходит процесс поглощения ионами Fe^{2+} энергии, испускаемой центрами свечения матрицы кристалла, и они выступают центрами тушения люминесценции в видимой области.

Исследования выполнены при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-33-90078.

Список литературы

1. Сидоров Н.В. Волк Т.Р., Маврин Б.Н., Калинин В.Т. Ниобат лития: дефекты, фоторефракция, колебательный спектр, поляритоны. М.: Наука, 2003.
2. Сидоров Н.В., Палатников М.Н. и др.// Оптика и спектроскопия. 2014. Т. 116. № 2. С. 298-305.

А.А. АНИКЬЕВ¹, М.Ф. УМАРОВ

Вологодский государственный университет

¹*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА В КРИСТАЛЛАХ НИОБАТА ЛИТИЯ С ДЕФЕКТАМИ СТЕХИОМЕТРИИ

Получены спектры рассеяния света на полно-симметричных колебаниях в кристаллах ниобата лития, различной степени несовершенства. По спектральному распределению комбинационного рассеяния света при комнатной температуре рассчитана обобщённая восприимчивость в низкочастотной области. Показано, что обобщённая восприимчивость на низких частотах в образцах ниобата лития различной добротности может быть аппроксимирована в модели ангармонического осциллятора, связанного через затухание с релаксацией акустических колебаний на дислокациях.

A.A. ANIKIEV¹, M.F. UMAROV

Vologda State University

¹*Bauman Moscow State Technical University*

RAMAN SCATTERING OF LIGHT IN LITHIUM NIOBATE CRYSTALS WITH STOICHIOMETRY DEFECTS

The spectra of light scattering on fully symmetric oscillations in lithium niobate crystals of varying degrees of imperfection are obtained. The generalized susceptibility in the low-frequency region is calculated from the spectral distribution of the Raman scattering of light at room temperature. It is shown that the generalized susceptibility at low frequencies in lithium niobate samples of various Q-values can be approximated in the model of an anharmonic oscillator associated through attenuation with relaxation of acoustic vibrations on dislocations.

Несмотря на то, что в последние годы были получены и исследованы соединения, превосходящие ниобат лития по отдельным свойствам, он остается модельным кристаллом для изучения влияния на его свойства примесей, дефектов, условий выращивания.

Целью настоящей работы является изучение особенности комбинационного рассеяния света в образцах ниобата лития, полученных в условиях выращивания, способствующих образованию нелокальных дефектов стехиометрии – дислокаций, границ зерен. Особый интерес в этой связи вызывает поведение крыла линии квазиупругого рассеяния.

Участвующие в эксперименте образцы ниобата лития были выращены методом Чохральского. Скорость вращения затравки составляла во всех экспериментах 40 оборотов/мин, скорость вытягивания изменялась от 5 до 23 мм/час в различных экспериментах. Вырезанные в форме прямоугольных параллелепипедов образцы из буль, полученных при разных условиях выращивания (всего 10 образцов) ориентировались с высокой точностью для экспериментов по КРС так, чтобы грани образцов совпадали с кристаллофизическими осями X, Y, Z (ось Z направлена вдоль оптической оси кристалла). Размеры кристаллов составляли приблизительно $5 \times 6 \times 7$ мм.

Измерения акустического поглощения и добротности кристаллов проводились на частоте 300 МГц радиотехническим методом, используя срезы $Y + 36^\circ$ для продольных акустических волн и X срез для сдвиговых волн. Кроме того, затухание и скорость продольных волн была измерена вдоль полярной оси кристаллов. Для всех образцов была определена акустическая добротность из измерений коэффициента поглощения звука.

Спектры комбинационного рассеяния света (КРС) возбуждались линией 514.5 нм аргонового лазера и регистрировались на модифицированном спектрометре ДФС-24 с использованием методики счёта фотонов. Разрешение спектральных линий составляло 2 см^{-1} , спектры обрабатывались с помощью программы ORIGIN 8.3. Точность определения частот, полуширин и интенсивностей спектральных линий составляла 2 см^{-1} , 3 см^{-1} и 6 % соответственно.

Измерение интенсивности рассеяния света на образцах ниобата лития с различной акустической добротностью показало, что с ростом акустического поглощения, интенсивность полосы 120 см^{-1} растет по логарифмическому закону. Возрастание интенсивности рассеяния на акустических колебаниях связано с ростом концентрации дефектов и соответственно расширением области зоны Бриллюэна, дающей вклад в рассеяние света первого порядка. Данное наблюдение подтверждает наше предположение о проявлении плотности акустических состояний в спектрах КРС за счёт нарушения правил отбора по волновому вектору.

Спектры были аппроксимированы в модели ангармонического осциллятора, связанного с релаксатором, при этом связь осциллятора с релаксатором была пропорциональна концентрации дефектов стехиометрии. Получено хорошее согласие экспериментальных данных с использованной моделью.

О.Ю. ПИКУЛЬ, Н.В. СИДОРОВ¹, Н.А. ТЕПЛЯКОВА¹,
М.Н. ПАЛАТНИКОВ¹

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск
¹*Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья*
им. И.В. Тананаева Кольского научного центра РАН, Апатиты, Мурманская обл.

ЛАЗЕРНАЯ КОНОСКОПИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ НИОБАТА ЛИТИЯ

Метод лазерной коноскопии с использованием лазерного излучения мощностью 90 мВт применён для исследования оптической однородности крупногабаритных кристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ (4 - 7.5 мол. %).

O.Yu. PIKOUL, N.V. SIDOROV¹, N.A. TEPLYAKOVA¹,
M.N. PALATNIKOV¹

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk
¹*I.V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral*
Raw Materials of Kola Science Center of the RAS, Apatity, Murmansk region

LASER CONOSCOPY OF LARGE-SIZED LITHIUM NIOBATE SINGLE CRYSTALS

The method of laser conoscopy using laser radiation with a power of 90 mW was used to study the optical homogeneity of large $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ crystals (4 - 7.5 mol. %).

Лазерная коноскопия [1], являясь экспресс-оценкой оптического качества крупногабаритных кристаллов, практически не ограничивает размеры исследуемых кристаллических буль и угловую апертуру конуса лучей, что позволяет наблюдать изохромы высоких порядков и анализировать оптическую однородность в глубине массивных кристаллических буль без вырезания из них тонких кристаллических образцов.

Анализ коноскопических картин серии кристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}^{2+}$ при высоком содержании Zn (4 - 7.5 мол. %) (толщина 40 мм), с большим шагом (4, 5, 6.5, 7.5 мол. %) по концентрации легирующей примеси показал (рис. 1), что все коноскопические картины содержат достаточно большое количество дефектов – на всех картинах присутствуют признаки аномальной оптической двуосности [2]. В целом оптическая однородность ухудшается с увеличением содержания Zn в кристаллах от 4 до 7.5 мол. %, при этом угол аномальных оптических осей увеличивается от

значения $2V = 12'$ для образца $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}^{2+}$ (4 мол. %) (рис. 1, картина 1) до значения $2V = 24'$ для образца $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}^{2+}$ (7.5 мол. %) (рис. 1, картина 6).

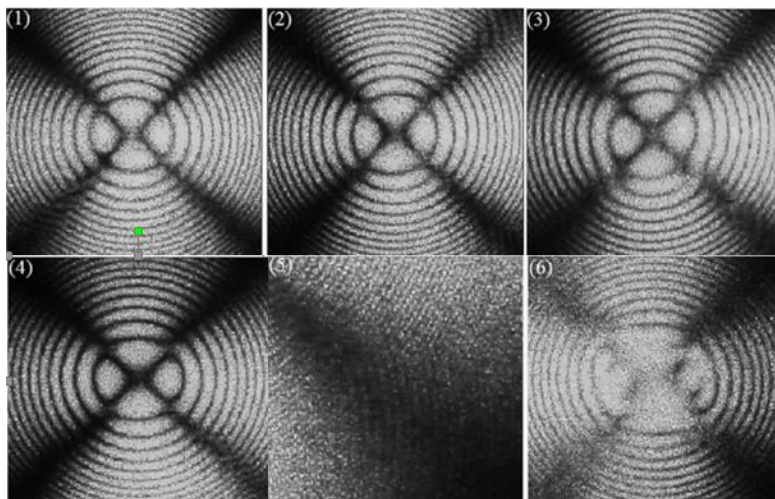


Рис. 1. Коноскопические картины ($P = 90$ мВт) $\lambda = 532$ нм кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}^{2+}$: 1 – 4, 2 – 5, 3 – 6.5, 4 и 5 – 7, 6 – 7.5 мол. %, кристаллические були, толщина в направлении оптической оси $Z = 40$ мм

Соответственно на порядок возрастает аномальное двулучепреломление от $\Delta n = 0,026 \cdot 10^{-5}$ до $0,557 \cdot 10^{-5}$. Существуют пороговые концентрации примеси в кристалле, при которых наблюдается резкое изменение оптических свойств материала, концентрация Zn в кристаллах ниобата лития 7.5 мол. % является пороговой. Необходимо отметить, что коноскопическая картина кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}^{2+}$ (7 мол. %), несмотря на высокую концентрацию легирующей примеси, наиболее соответствует одноосному кристаллу (рис. 1, картина 4) по сравнению с коноскопическими картинами остальных кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}^{2+}$ (4, 5, 6.5, 7.5 мол. %).

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.
2. Штукенберг А.Г., Пунин Ю.О. Оптические аномалии в кристаллах. СПб.: Наука, 2004.

А.А. АНИКЬЕВ¹, Н.В. СИДОРОВ², М.Ф. УМАРОВ

Вологодский государственный университет

¹*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

²*Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья
им. И.В. Тананаева Кольского научного центра РАН, Апатиты, Мурманская обл.*

КВАЗИУПРУГОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА В КОНГРУЭНТНЫХ КРИСТАЛЛАХ НИОБАТА ЛИТИЯ

Получены спектры квазиупругого и комбинационного рассеяния света при 296 К конгруэнтных кристаллов ниобата лития различной степени дефектности, определяемой по акустической добротности. Проведён количественный анализ спектров в интервале частот 0 - 70 см⁻¹ для образцов с различной величиной добротности в модели, учитывающей связь низкочастотной оптической моды A₁(TO) – типа симметрии с релаксирующей собственной энергией, описывающей дефекты стехиометрии. На основе полученных результатов установлено, что в образовании динамического центрального пика при структурном фазовом переходе в кристаллах ниобата лития существенную роль играет дефекты различного происхождения.

A.A. ANIKIEV¹, N.V. SIDOROV², M.F. UMAROV

Vologda State University

¹*Bauman Moscow State Technical University*

²*I.V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral
Raw Materials of Kola Science Center of the RAS, Apatity, Murmansk region*

QUASI-ELASTIC LIGHT SCATTERING IN CONGRUENT LITHIUM NIOBATE CRYSTALS

The spectra of quasi-elastic and Raman scattering of light at 296 K of congruent lithium niobate crystals of various degrees of defectiveness, determined by the acoustic Q-factor, have been obtained. A quantitative analysis of spectra in the frequency range 0 – 70 cm⁻¹ for samples with different Q-factor values in a model that takes into account the relationship of a low-frequency optical mode A₁(TO) – type symmetry with a relaxing intrinsic energy describing stoichiometry defects. Based on the results obtained, it was found that defects of various origins play an essential role in the formation of a dynamic central peak during a structural phase transition in lithium niobate crystals.

Несмотря на большое число исследований спектров комбинационного рассеяния света (КРС) [1 - 3], к настоящему времени остаётся нерешённым ряд важных вопросов, которые являются предметом

дискуссий и которые представляют интерес для дальнейших экспериментальных и теоретических исследований.

В данной работе с целью выяснения характера изменений в спектрах комбинационного и квазиупругого рэлеевского рассеяния света, обусловленных различными дефектами кристаллической решётки, выполнены исследования и анализ спектров КРС и квазиупругого рассеяния света конгруэнтных образцов кристаллов LiNbO_3 , существенно отличающихся состоянием дефектности структуры при температуре 296 К. Исследовались кристаллы ниобата лития трёх типов, выращенные одним методом Чохральского в воздушной атмосфере: номинально чистые стехиометрические, выращенные из расплава с 58.8 мол.% Li_2O (тип III), конгруэнтные кристаллы ниобата лития, выращенные из конгруэнтного расплава с 48.6 мол.% Li_2O (тип II) и кристаллы, выращенные из конгруэнтного расплава с различными скоростями вытягивания затравки из расплава (тип I).

Спектры КРС образцов возбуждались линией 514.5 нм аргонового лазера ПА-120 и регистрировались на двойном монохроматоре ДФС-24 с системой счёта фотонов. Из анализа спектров ниобата лития трёх типов следует, что рост количества крупномасштабных дефектов инициированных условиями выращивания в образцах типа I приводит к проявлению акустической плотности состояний в низкочастотной области спектра 5 - 100 см^{-1} связанному с нарушением правил отбора по волновому вектору во всей зоне Бриллюэна кристаллов.

При этом поведение интенсивности рэлеевского рассеяния на дефектах хорошо описывается в модели взаимодействия квазигармонического осциллятора с затуханием, роль которого играет полносимметричная оптическая мода, и медленными движениями акустических мод на дефектах с характерным временем релаксации.

Выявлено, что с ростом концентрации дислокаций, интенсивность квазиупругого рассеяния резко возрастает, вместе с тем интенсивность квазиупругого рассеяния на нулевой частоте расходится при уменьшении добротности (увеличении концентрации дефектов) по степенному закону.

Оценен характер зависимости затухания оптического фона, сила связи и время релаксации от концентрации дефектов, и акустической добротности (увеличении плотности дислокаций) в образцах.

Список литературы

1. Lengyel K., Péter Á., et. al. // Applied Physics Reviews. 2015. V. 2(4). P. 040601
2. Fontana M.D., Bourson P. // Applied Physics Reviews. 2015. V. 2(4). P. 040602.
3. Amikiev A.A., Umarov M.F., Scott J.F. // AIP Advances. 2018. V. 8. P. 115016.

С.М. КОСТРИЦКИЙ, О.Г. СЕВОСТЬЯНОВ¹,
И.М. ЧИРКОВА¹, М.Н. ПАЛАТНИКОВ²

НПК «Оптолинк», Зеленоград

¹ Кемеровский государственный университет

*² Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья
им. И.В. Тананаева Кольского научного центра РАН, Апатиты, Мурманская обл.*

ФОТОРЕФРАКТИВНЫЙ ЭФФЕКТ И ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В НИОБАТЕ ЛИТИЯ

Исследованы фоторефрактивный эффект и инфракрасная фотолюминесценция в легированных кристаллах LiNbO_3 при лазерном возбуждении. Показано, что люминесцентная полоса локализована в ближнем ИК-диапазоне (700 - 1000 нм) и вместе с фоторефрактивным эффектом зависит от вида и концентрации легирующей примеси.

S.M. KOSTRITSKIY, O.G. SEVOSTYANOV¹,
I.M. CHIRKOVA¹, M.N. PALATNIKOV²

RPC Optolink Ltd, Zelenograd

¹ Kemerovo State University

*² I.V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw
Materials of Kola Science Center of the RAS, Apatity, Murmansk region*

PHOTOREFRACTION AND PHOTOLUMINESCENCE IN LITHIUM NIOBATE CRYSTALS

The photorefractive effect and infrared photoluminescence in doped LiNbO_3 crystals were investigated at laser excitation. It has been established, that the related emission band is observed within near-IR range (700 - 1000 nm) and it is dependent on type and concentration of dopant similar to photorefraction.

Кристаллы LiNbO_3 нашли широкое применение в нелинейной и интегральной фотонике благодаря удачному сочетанию физических свойств. При этом параллельное развитие техники экспериментальных исследований позволяет обнаруживать новые особенности этих хорошо изученных материалов. Так, ранее нами [1, 2] были исследованы процессы появления в химически восстановленных монокристаллах LiNbO_3 и LiTaO_3 широкополосной инфракрасной фотолюминесценции (ИКФЛ) при лазерном возбуждении. Было показано, что в LiNbO_3 данная люминесцентная полоса: а) может быть обнаружена совместно со

спектром КРС при интенсивной лазерной накачке в красном участке видимого диапазона длин волн; б) преимущественно локализована в ближнем ИК-диапазоне (700 - 1000 нм); в) имеет нелинейную зависимость от мощности возбуждающего лазерного излучения; г) выход ИКФЛ в LiNbO_3 сильнейшим образом зависит от композиционного состава и степени химического восстановления образцов кристаллов. К разработке феноменологической модели явления ИКФЛ в LiNbO_3 нами была привлечена концепция поляронной рекомбинационной люминесценции [2]. Для поиска новых возможных путей управления квантовым выходом ИКФЛ проведено комплексное исследование интенсивности люминесценции в специально легированных кристаллах ниобата лития, в которых помимо наличия примесных дефектов возможно формирование дефектных комплексов смешанной природы.

В работе нами использованы объёмные кристаллы: LiNbO_3 , $\text{LiNbO}_3\text{:Mg}$, $\text{LiNbO}_3\text{:Mg:Fe}$, $\text{LiNbO}_3\text{:Fe}$ и $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$. Использование примесей, как увеличивающих (Fe), так и уменьшающих (Mg, Zn) фоторефрактивный эффект (ФРЭ), позволило установить корреляцию между ИКФЛ и ФРЭ. Спектры ИКФЛ регистрировались в геометрии обратного рассеяния с помощью спектрометра HORIBA LabRAM HR800. Использовано лазерное излучение накачки с длиной волны 632,81 нм. Установлено, что полоса ИКФЛ наблюдается в спектральном диапазоне от 700 до 1000 нм и имеет одинаковую форму в спектрах номинально чистых и всех по-разному легированных кристаллов. Интегральная интенсивность этой полосы зависит от технологии легирования, то есть от условий формирования дефектных комплексов с участием собственных и примесных дефектов кристалла, влияющих на величину ФРЭ. Определение величины ФРЭ выполнялось из дифракционной эффективности фоторефрактивных голограмм, записанных во всех исследованных кристаллах. Полученные данные позволили использовать ИКФЛ для предварительной оценки величины ФРЭ и для контроля однородности химического состава кристаллов ниобата лития, используемых для изготовления устройств интегральной фотоники.

Список литературы

1. Kostritskii S.M., Sevostyanov O.G., Bourson P., Aillerie M., Fontana M.D., Kip D. Comparative study of composition dependences of photorefractive and related effects in LiNbO_3 and LiTaO_3 crystals // *Ferroelectrics*. 2007. V. 352. P. 61-71.
2. Kostritskii S.M., Aillerie M., Margueron S., Bourson P. Gated luminescence in As-grown and reduced undoped LiNbO_3 crystals // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2013. V. 416. P. 012033.

Р.А. ТИТОВ, 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.*

ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСООБРАЗУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ B^{3+} НА КАТИОННЫЙ СОСТАВ СИСТЕМЫ $Li_2O-Nb_2O_5-B_2O_3$

На основе результатов расчёта изобарно-изотермического потенциала (энергии Гиббса) образования боратов регламентированных катионов в расплаве $Li_2O-Nb_2O_5-B_2O_3$ установлено, что катионы B^{3+} связывают примесные металлы (Al, Ca, Pb) в расплаве, тем самым повышая чистоту монокристаллов $LiNbO_3:B$.

R.A. TITOV, N.V. SIDOROV, M.N. PALATNIKOV

*I.V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral
Raw Materials of Kola Science Center of the RAS, Apatity, Murmansk region*

INFLUENCE OF THE COMPLEXING ABILITY OF B^{3+} ON THE CATIONIC COMPOSITION OF THE $Li_2O-Nb_2O_5-B_2O_3$ SYSTEM

The study considers the influence of B_2O_3 on $Li_2O-Nb_2O_5-B_2O_3$ system. Based on calculated Gibbs' free energy of the borates formation found that the B^{3+} binds the impurities (Al, Ca, Pb) present in congruent melt. This increases the purity of the $LiNbO_3:B$ single crystals.

Кристалл ниобата лития ($LiNbO_3$) на протяжении многих лет востребован в качестве функционального материала для преобразования лазерного излучения в устройствах электронной техники. При этом для создания преобразователей на периодически поляризованных доменах субмикронных размеров перспективны кристаллы ниобата лития стехиометрического и близкого к нему составов, обладающие низким коэрцитивным полем. В последние годы нами активно развивается технологический подход, заключающийся в получении близких к стехиометрическим номинально чистых монокристаллов $LiNbO_3:B$, выращенных с использованием химически активного флюса B_2O_3 [1 - 3]. В отличие от легирующих катионов металлов (Zn, Mg и др.), катионы B^{3+} входят в структуру кристаллов $LiNbO_3:B$ в следовых количествах ($4 \cdot 10^{-4}$ мол. % [1]), локализуясь в составе группы $[BO_3]^{3-}$ в гранях вакантных тетраэдрических пустот структуры кристалла [2]. Такие кристаллы обладают низким эффектом фоторефракции, высокой структурной и композиционной однородностью [1 - 3]. Однако данные о

влиянии состава расплава системы $\text{Li}_2\text{O}-\text{Nb}_2\text{O}_5-\text{B}_2\text{O}_3$ на тип и электрохимическую активность входящих в него комплексов, из-за сложностей проведения экспериментов при высоких температурах, на данный момент отсутствуют. По этой причине влияние бора и боропроизводных соединений на свойства расплава ниобата лития возможно исследовать лишь с позиции анализа свойств и структурных особенностей уже выращенных монокристаллов [3].

Наличие примесных металлов в структуре кристаллов LiNbO_3 негативно сказывается на их оптических характеристиках [4]. По этой причине, с целью подтверждения концепции о способности связывания катионов регламентируемых следовых примесных металлов (Al, Ca, Pb) в расплаве конгруэнтного состава, предотвращая тем самым их переход в структуру кристалла, нами был выполнен расчёт изобарно-изотермического потенциала образования боратов различного состава. Используя подход и справочные данные, представленные в работах [3, 5], нами был выполнен расчёт энергии Гиббса образования ряда боратов примесных металлов. Для всех рассмотренных химических превращений изменение энергии Гиббса приобретает отрицательные значения вне зависимости от верхнего температурного предела: 1573 K: $\Delta G(\text{LiBO}_2) = -179.504$ кДж/моль, $\Delta G(\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7) = -217.706$ кДж/моль, $\Delta G(\text{CaB}_2\text{O}_4) = -112.586$ кДж/моль, $\Delta G(\text{CaB}_4\text{O}_7) = -116.118$ кДж/моль, $\Delta G(\text{Ca}_2\text{B}_2\text{O}_5) = -181.428$ кДж/моль, $\Delta G(\text{Ca}_3\text{B}_2\text{O}_6) = -234.669$ кДж/моль; 1400 K: $\Delta G(\text{PbB}_2\text{O}_4) = -39.873$ кДж/моль; 1308 K: $\Delta G(\text{Al}_4\text{B}_2\text{O}_9) = -86.528$ кДж/моль; 1107 K: $\Delta G(\text{Li}_2\text{B}_6\text{O}_{10}) = -142.195$ кДж/моль. Полученные данные, с теоретической точки зрения, подтверждают выдвинутую нами концепцию о состоятельности флюса B_2O_3 в качестве комплексообразующего агента для связывания примесных металлов (Al, Ca, Pb) в расплаве системы $\text{Li}_2\text{O}-\text{Nb}_2\text{O}_5-\text{B}_2\text{O}_3$ для выращивания близких к стехиометрическим номинально чистых монокристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{B}$, обладающих низким эффектом фоторефракции и коэрцитивным полем.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-33-90025).

Список литературы

1. Sidorov N.V., Palatnikov M.N., et al. // Opt. Spectrosc. 2016. V.121. №1. P.36-44.
2. Sidorov N.V., Teplyakova N.A., et al. // Crystals. 2021. V.11. I.5. P.458(1-37).
3. Титов Р.А., Сидоров Н.В. и др. // Вестник КНИЦ РАН. 2021. Т.2. №14. С.16-28.
4. Prokhorov A.M., Kuzminov Yu.S. Physics and Chemistry of Crystalline Lithium Niobate. New York: Adam Hilger, 1990.
5. Наумов Г.Б., Рыженко Б.Н., Ходаковский И.Л. Справочник термодинамических величин // М.: АТОМИЗДАТ, 1971.

Р.И. АНИСИМОВ, А.А. КОЛМАКОВ, А.С. ТЕМЕРЕВА,
А.Е. ШАРАЕВА, С.М. ШАНДАРОВ, И.В. ТИМОФЕЕВ^{1,2},
М.В. ПЯТНОВ^{1,2}

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

¹*Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск*

²*Сибирский федеральный университет, Красноярск*

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕДИ В КРИСТАЛЛАХ LiNbO₃:Cu С ПОВЕРХНОСТНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ

Представлены результаты исследований распределения примеси по глубине в структурах, сформированных термической диффузией меди в пластинах X-среза ниобата лития.

R.I. ANISIMOV, A.A. KOLMAKOV, A.S. TEMEREVA,
A.E. SHARAYEVA, S.M. SHANDAROV, I.V. TIMOFEEV^{1,2},
M.V. PYATNOV^{1,2}

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

¹*Kirensky Institute of Physics of FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk*

²*Siberian Federal University, Krasnoyarsk*

ANALYSIS OF COPPER DISTRIBUTION IN LiNbO₃:Cu CRYSTALS WITH SURFACE DOPING

The results of studies of the depth distribution of impurities in structures formed by thermal diffusion of copper in X-cut plates of lithium niobate are presented.

Применение в качестве основы для реализации фотовольтаических пинцетов пластины X-среза LiNbO₃:Cu, созданной методом диффузии меди из металлической плёнки при температуре 1000 °С, продемонстрировано в [1]. Распределение ионов меди в этом случае аппроксимировалось функцией Гаусса с максимумом при $x = 0$. Однако в [2] получено, что при температуре 800 °С максимум в распределении ионов Cu⁺ и Cu²⁺ расположен на глубине около 400 мкм от поверхности, через которую осуществлялась диффузия.

В данной работе реализована диффузия меди из металлической плёнки с толщиной 600 нм при температуре 1000 °С в две пластины ниобата лития X-среза, с толщинами 1,33 и 1,24 мм. Для первого из них (№ 1) время диффузии составляло 20 часов, а для второго (№ 2) – 9 часов. Средняя концентрация ионов меди C_{Cu^+} и $C_{Cu^{2+}}$ в образцах определялась по

показателям поглощения на длинах волн 477 и 1040 нм соответственно с использованием известной методики [3]. Получено, что суммарная средняя концентрации ионов меди $C_{\text{Cu}^+} + C_{\text{Cu}^{2+}}$ может быть оценена как $2,96 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ (0,16 ат.%) и $4,6 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ (0,25 ат.%) для образцов № 1 и № 2 соответственно. Однако исследования спектров характеристического рентгеновского излучения на растровом электронном микроскопе LEO-1455VP показали, что на обоих X-поверхностях образца № 1 концентрация меди ниже чувствительности данного метода. Такие же измерения, проведённые для образца № 2 на электронном микроскопе Hitachi SU3500/Model3500 SEM, позволили оценить концентрацию ионов меди на границе $x = 0$, как 0,34 ат.%.

Изучение распределения Cu по глубине образца № 1 проводилось на лазерном атомно-эмиссионном спектрометре LSS-1. О его характере можно судить по зависимости интенсивности спектральной линии меди от глубины x , на которой проводилось последовательное испарение вещества образца, с шагом по 5 мкм. Эксперимент показал, что при $x = 0$ концентрация меди минимальна, а её максимум достигается на глубине $x \approx 330$ мкм, с последующим спадом.

Исследование распределения показателя поглощения по координате x проводилось для образца № 2 на длинах волн 532 и 655 нм по методике, описанной в [1]. В этом случае сфокусированное линзой лазерное излучение пропусклось через кристаллический образец через его оптически полированные грани, перпендикулярные оси z . Установлено, что показатели поглощения на данных длинах волн имеют резкую зависимость от координаты x на глубине около 300 мкм. Однако значительный диаметр перетяжки используемого пучка (~ 90 мкм), при конфокальном параметре около 16 мм, не позволил восстановить профиль распределения ионов меди для глубин $x < 50$ мкм.

Таким образом, эксперименты показывают, что и при температурах диффузии 1000 °С профиль распределения Cu в пластине X-среза ниобата лития может иметь немонотонный характер, описанный в [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Госзадания на 2020-2022 годы (задание FEWM-2020-0038/3). Использовано оборудование Красноярского регионального ЦКП ФИЦ КНЦ СО РАН.

Список литературы

1. Мамбетова К.М. и др. // Изв. вузов. Физика. 2019. Т. 64. № 4. С. 89-93.
2. Suchanek G., et al. // Ferroelectrics. 2019. V. 539. P. 151-157.
3. Peithmann K., et al. // Phys. Rev. B. 2001. V. 61. P. 4615-4620.

А.В. МАКАРЕВИЧ, В.Н. НАВНЫКО

*Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина,
Беларусь*

УСИЛЕНИЕ ПРЕДМЕТНОЙ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ НА ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ГОЛОГРАММАХ В КРИСТАЛЛЕ BSO

Представлены результаты экспериментальных исследований зависимости коэффициента усиления γ предметной световой волны от азимутов линейной поляризации Ψ_0 световых пучков при их встречном взаимодействии на фоторефрактивной решётке в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ среза (001).

A.V. MAKAREVICH, V.N. NAUNYKA

Mozyr State Pedagogical University named after I.P. Shamyakin, Belarus

GAIN OF THE OBJECT LIGHT WAVE ON REFLECTIVE HOLOGRAMS IN BSO CRYSTAL

The results of experimental studies of the object light wave gain γ dependence on the azimuths of linear polarization Ψ_0 of light beams during their counter-interaction on a photorefractive grating in a $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ crystal of the (001)-cut are presented.

Известно, что для эффективного практического применения фоторефрактивных кристаллов в голографических приложениях необходимо оптимизировать условия взаимодействия в них световых волн [1, 2]. В связи с этим целью данной работы явилось экспериментальное определение оптимальных условий перекачки световой энергии из опорного пучка в предметный в кристалле силикосилленита висмута $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO) среза (001). Толщина образца составляла 3,73 мм, а величина удельного вращения плоскости поляризации 22 град/мм.

Пространственная ориентация кристалла относительно единичных векторов рабочей системы координат, связанной с плоскостью распространения волн R и S , показана на рис. 1. При проведении экспериментов опорный R световой пучок был поляризован строго в плоскости падения, а азимут поляризации Ψ_0 предметного пучка S до его вхождения в кристалл мог изменяться. Поворот кристалла в пространстве вокруг оси OO' задавался углом θ , отсчитываемым от направления, совпадающего с единичным вектором $-\vec{e}_1$, к кристаллографическому направлению [010]. Изменение угла θ в указанном на рис. 1 направлении,

по сути, соответствовало повороту в противоположном направлении плоскостей поляризаций обеих волн относительно кристалла. Поэтому получаемая зависимость $\gamma(\theta)$ фактически соответствовала зависимости $\gamma(\Psi_0)$. Результаты выполненных экспериментальных исследований для азимутов поляризации предметной волны $\Psi_0 = 82^\circ$ (условие согласования волн в кристалле) и 127° представлены и на рис. 2.

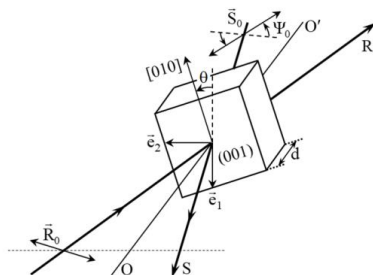


Рис. 1. Ориентация кристалла относительно рабочей системы координат

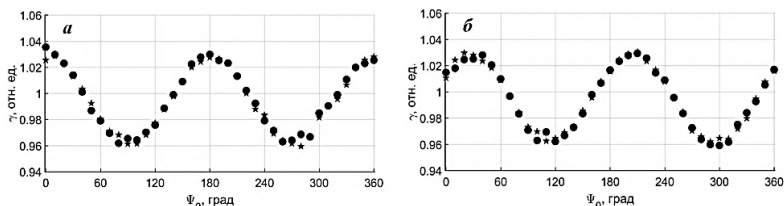


Рис. 2. Зависимости $\gamma(\Psi_0)$ при различных азимутах линейной поляризации Ψ_0 предметной световой волны: при $\Psi_0 = 82^\circ$ (а), при $\Psi_0 = 127^\circ$ (б)

Из представленных графиков видно, что зависимости $\gamma(\Psi_0)$ имеют синусоидальный характер, причём изменение поляризации предметной световой волны на $\Delta\Psi = 45^\circ$ приводит к смещению зависимостей $\gamma(\Psi_0)$ на 22.5° . Данная тенденция наблюдается и для дальнейшего изменения поляризации предметного пучка, что может использоваться для управления энергетическими характеристиками предметной волны при встречном двухволновом взаимодействии на отражательной фоторефрактивной решётке и предсказания положения максимумов зависимостей $\gamma(\Psi_0)$.

Список литературы

1. Solymar L., Webb D.J., Grunnet-Jepsen A. The physics and applications of photorefractive materials. Oxford: Clarendon Press, 1996.
2. Шепелевич В.В. Голография в фоторефрактивных оптически активных кристаллах. Минск : Изд. центр БГУ, 2012.

В.В. ДАВЫДОВСКАЯ, В.Н. НАВНЫКО,
А.А. БУШКО, В.А. ВЕЛИЧКО

*Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина,
Беларусь*

**ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ
РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ДВУМЕРНЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ
В ФОТОРЕФРАКТИВНОМ КРИСТАЛЛЕ SBN**

Получена двумерная зависимость степени самофокусировки двумерного гауссова светового пучка в фоторефрактивном кристалле SBN от направления, внешнего, приложенного к кристаллу электрического поля и начальной поляризации светового пучка на входе в кристалл.

V.V. DAVYDOUSKAYA, V.N. NAUNYKA,
A.A. BUSHKO, V.A. VELICHKO

Mozyr State Pedagogical University named after I.P. Shamyakin, Belarus

**CHOICE OF OPTIMAL GEOMETRY OF PROPAGATION
AND INTERACTION OF TWO-DIMENSIONAL LIGHT BEAMS
IN A PHOTOREFRACTIVE CRYSTAL SBN**

A two-dimensional dependence of the degree of self-focusing of a two-dimensional Gaussian light beam in an SBN photorefractive crystal on the direction, external electric field applied to the crystal, and the initial polarization of the light beam at the entrance to the crystal is obtained.

Фоторефрактивные кристаллы ниобата бария-стронция (SBN) впервые были синтезированы более 60 лет назад [1], однако они до сих пор вызывают значительный интерес при изучении разнообразных оптических эффектов и явлений (например, [2 - 4]), также продолжают исследования физических свойств и самих кристаллов [5 - 7].

При выборе геометрии, в которой ось ox направлена вдоль кристаллографической оси кристалла $\vec{c}$, которая является оптической осью кристалла, а приложенное электрическое поле также направлено параллельно $\vec{c}$, теоретическое моделирование различных световых явлений, в том числе распространения и взаимодействия световых пучков в фоторефрактивном кристалле SBN, обычно ведется только при учёте компонент r_{33} и r_{13} электрооптического тензора $\hat{r}$ [8 - 10].

Рассмотрим распространение двумерных гауссовых световых пучков с произвольной входной поляризацией, определяемой углом ϕ в фоторефрактивном кристалле SBN, учитывая все компоненты электрооптического тензора $\hat{r}$ при различных направлениях приложенного внешнего электрического поля, т.е. изменяющемся угле θ .

Для моделирования использовались параметры кристалла SBN, приведённые в [11], радиус перетяжки гауссова светового пучка 12 мкм, значение напряжённости внешнего электрического поля 1.2 кВ/см, толщина кристалла 10 мм.

На рис. 1 точками А, В, С, D обозначены оптимальные значения входной поляризации (ϕ) и направления внешнего электрического поля (θ) для достижения максимальной фокусировки светового пучка.

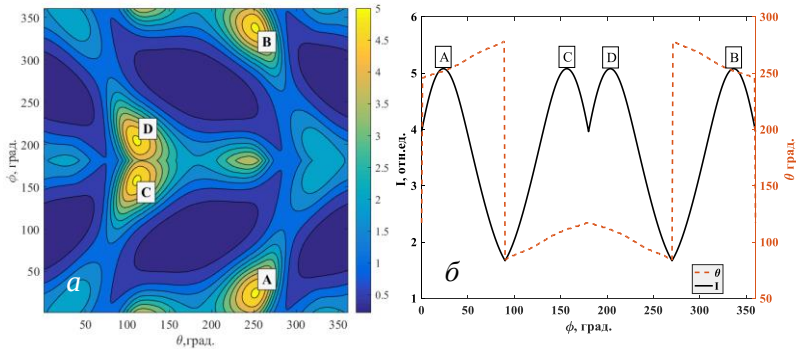


Рис. 1. Зависимость степени фокусировки двумерного гауссова пучка от его входной поляризации (ϕ) и направления внешнего поля, приложенного к кристаллу (θ): распределение относительной интенсивности светового пучка на выходе из кристалла (а); максимумы фокусировки световых пучков (б)

Список литературы

1. Francombe M.H. // Acta Cryst. 1960. V. 13(2). P. 131-140.
2. Stoyanov L. // JOSA B. 2014. V. 31. P. 1159-1164.
3. Dimitrov N. // Bulgarian Journal of Physics. 2016. V. 43. P. 21-29.
4. Diebel F. // New J. Phys. 2016. V. 18. P. 053038.
5. Kshirsagar S.H. // Journal of advanced dielectrics. 2015. V. 5.(1). P. 1550001.
7. Andriyevsky B. // Ferroelectrics. 2012. V. 426. P. 194-205.
8. Tiemann M., Halfmann T., Tschudi T. // Opt. Commun. 2009. V. 282. P. 3612-3619.
9. Petrović M., et. al. // Physical Review Letters. 2005. V. 95. P. 901-904.
10. Imbrock J., Heese C., Denz C. // Appl. Phys. B. 2009. V. 95. P. 261-268.
11. Петров М.П. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. СПб.: Наука, 1992.

А.В. МАКАРЕВИЧ, С.Ф. НИЧИПОРКО, В.Н. НАВНЫКО,
П.И. РОПОТ¹, С.М. ШАНДАРОВ²

*Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина,
Беларусь*

¹*Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск*

²*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники*

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ОБМЕН СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ НА СМЕШАННЫХ ГОЛОГРАММАХ В КРИСТАЛЛЕ $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$

Представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований взаимной трансформации энергии световых волн на смешанных голограммах в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ среза $(\bar{1}\bar{1}0)$ и произвольного среза.

A.V. MAKAREVICH, S.F. NICHIPORKO, V.N. NAUNYKA,
P.I. ROPOT¹, S.M. SHANDAROV²

¹*Mozyr State Pedagogical University named after I.P. Shamyakin, Belarus*

²*B.I. Stepanov Institute of Physics of the NAS of Belarus, Minsk*

²*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*

ENERGY EXCHANGE OF LIGHT BEAMS ON MIXED HOLOGRAMS IN A $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ CRYSTAL

The results of experimental and theoretical studies of the mutual transformation of the energy of light waves on mixed holograms in a $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ crystal of a $(\bar{1}\bar{1}0)$ -cut and an arbitrary cut are presented.

В статье [1] было показано, что кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (ВТО) могут формироваться фазово-амплитудные (смешанные) голограммы. В рамках настоящей работы представленная в [1] модель смешанных голограмм использована для теоретического анализа коэффициента усиления γ предметной световой волны в указанном представителе класса силленитов.

На рис. 1 приведены экспериментальные (ранее представленные и описанные в [2]), а также теоретические (полученные на основе модели смешанных голограмм) результаты по зависимостям коэффициента усиления γ от ориентационного угла θ кристалла ВТО среза $(\bar{1}\bar{1}0)$ при различных азимутах линейной поляризации Ψ_0 световых волн. Используемые при расчётах параметры кристалла заимствованы из [2],

за исключением значения $\kappa = 2,1 \text{ м}^{-1}$, соответствующего [1] и характеризующего дифракционный вклад амплитудной составляющей смешанной голограммы. Экспериментально апробированная модель смешанных голограмм была применена для теоретического анализа перекачки световой энергии в кристалле ВТО произвольного среза при различных значениях θ и Ψ_0 . Результаты такого теоретического анализа представлены на рис. 2 с использованием описанной в [3] методики построения указательных поверхностей для зависимости коэффициента усиления γ от среза кристалла.

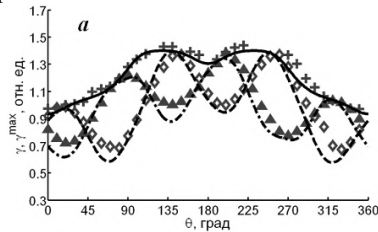


Рис. 1. Экспериментальные и теоретические зависимости $\gamma(\theta)$

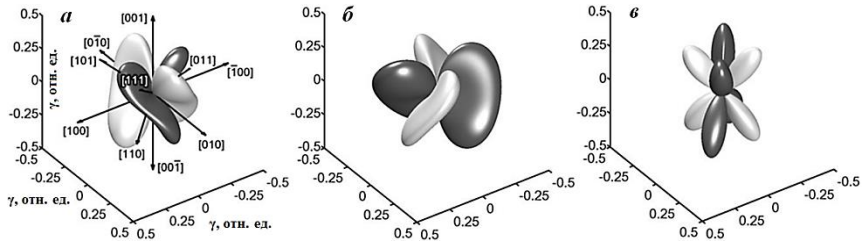


Рис. 2. Указательные поверхности коэффициента усиления γ : при $\theta = 30^\circ$ и $\Psi_0 = 30^\circ$ (а); при $\theta = 120^\circ$ и $\Psi_0 = 45^\circ$ (б); при $\theta = 200^\circ$ и $\Psi_0 = 0^\circ$ (в)

Как видно из рис. 2, перекачка световой энергии на пропускающих смешанных голограммах является функцией, существенно зависящей от значений θ и Ψ_0 , а также от используемого кристаллического среза, что должно быть принято во внимание при практическом применении кристалла ВТО, в частности, для оптимизации перекачки в нём энергии световых пучков при усилении оптических изображений.

Список литературы

1. Шепелевич В.В., Макаревич А.В., Шандаров С.М. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. № 22. С. 83-89.
2. Zagorskiy A.E., Shepelevich V.V., Nichiporko S.F., et. al. // Opt. mat. 2001. V. 18. № 1. P. 131-133.
3. Навыко В.Н., Шепелевич В.В. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. № 17. С. 16-23.

В.Н. НАВНЫКО, А.В. МАКАРЕВИЧ, Г.В. КУЛАК,
С.М. ШАНДАРОВ¹

*Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина,
Беларусь*

¹*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники*

ВЛИЯНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ НА ОБРАЩЕНИЕ ВОЛНОВОГО ФРОНТА В КРИСТАЛЛАХ $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$

Исследовано влияние оптической активности на эффективность обращения волнового фронта при четырёхволновом взаимодействии в кристаллах $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ среза (001). Определены интервалы значений толщины кристалла, при которых может достигаться наибольшая интенсивность обращённой волны.

V.N. NAUNYKA, A.V. MAKAREVICH, G.V. KULAK,
S.M. SHANDAROV¹

Mozyr State Pedagogical University named after I.P. Shamyakin, Belarus

¹*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*

EFFECT OF OPTICAL ACTIVITY ON WAVEFRONT REVERSAL IN $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ CRYSTAL

The effect of optical activity on wavefront reversal at four-wave mixing in $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ crystals of (001)-cut has been studied. The intervals of crystal thickness values at which the highest intensity of the reversed wave can be achieved are determined.

Обращение волнового фронта при четырёхволновом взаимодействии (ЧВВ) может быть реализовано в фоторефрактивных кристаллах класса симметрии 23 [1]. Таким кристаллам присуща оптическая активность, которая существенно влияет на свойства формируемых в них голограмм [2].

Целью работы является изучение влияния оптической активности на интенсивность обращённой световой волны при ЧВВ на отражательных голографических решётках, сформированных в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO) среза (001), от его толщины.

Схема ЧВВ представлена на рис. 1. Параметры кристалла заимствовались из [3]. На вставке показаны ориентации волновых векторов $\mathbf{K}$ отражательных голограмм относительно рабочей системы координат ($\mathbf{e}_1$, $\mathbf{e}_2$, $\mathbf{e}_3$). Вектор $\mathbf{E}_i$ ($i = 1, 2, 3, 4$) отображает векторную амплитуду линейно поляризованной i -ой волны. Азимут поляризации ψ_i равен углу между векторной амплитудой $\mathbf{E}_i$ и единичным вектором $\mathbf{e}_{i2}$,

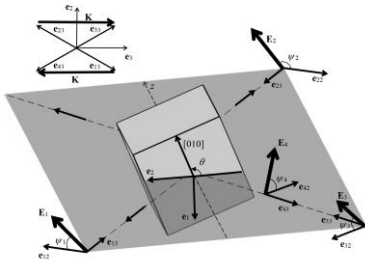


Рис. 1. Схема четырёхволнового взаимодействия на отрагательных решётках в кристалле BSO

лежащим в плоскости падения. Вектор e_{i3} совпадает с волновой нормалью i -й волны.

При расчётах полагалось, что в кристалле формируются отрагательные голограммы с волновыми векторами, параллельными направлению $[001]$. Максимальные и минимальные значения коэффициента отражения выбирались среди значений k_{refl} , рассчитанных для различных комбинаций ψ_i .

Учёт оптической активности (рис. 2) обуславливает качественные изменения представленных графических зависимостей $k_{\text{refl}}(d)$. Видно, что без учёта оптической активности k_{refl} возрастает с увеличением толщины кристалла d . В оптически активной среде наибольшие значения k_{refl} достигаются в том случае, когда поворот плоскости поляризации световой волны в кристалле приблизительно равен 90° ($d \approx 4$ мм). В том случае, когда поворот плоскости поляризации при распространении световой волны в кристалле приближается к 180° ($d \approx 8$ мм), значения k_{refl} стремятся к нулю.

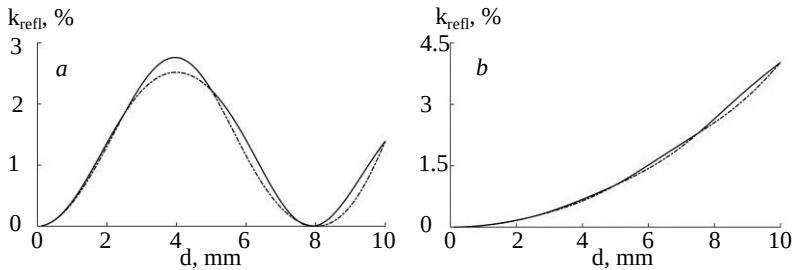


Рис. 2. Зависимости максимальных (сплошные линии) и минимальных (штриховые линии) значений коэффициента отражения k_{refl} от толщины d кристалла, полученные с учётом (а) и без учёта (б) оптической активности

Список литературы

1. Stepanov S.I., Petrov M.P. // Opt. Commun. 1985. V. 53 (1). P. 64.
2. Shepelevich V.V., Nichiporko S.F., et. al. // Ferroelectrics. 2002. V. 266. P. 305.
3. Shepelevich V.V., Egorov N.N., et. al. // J Opt. Soc. Am. B. 1994. V. 11 (8). P. 1394.

В.Г. ДЮ, М.Г. КИСТЕНЕВА, С.М. ШАНДАРОВ

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

ВЛИЯНИЕ ЗАСВЕТКИ НЕПРЕРЫВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ НА ИЗМЕНЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В КРИСТАЛЛЕ $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca}$

Представлены результаты экспериментальных исследований спектральных зависимостей оптического поглощения в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca}$, подвергнутого последовательной засветке непрерывным лазерным излучением: вначале с длиной волны $\lambda_i = 532$ нм, а затем с $\lambda_n = 596, 631, 633, 655, 871$ и 1064 нм.

V.G. DYU, M.G. KISTENEVA, S.M. SHANDAROV

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

INFLUENCE OF CONTINUOUS LASER RADIATION ON OPTICAL ABSORPTION CHANGES IN $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca}$ CRYSTAL

The results of experimental studies of the spectral dependences of optical absorption in $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca}$ crystal exposed to sequential illumination by continuous laser radiation first with $\lambda_i = 532$ nm and then with $\lambda_n = 596, 631, 633, 655, 871$ and 1064 nm are presented.

В кристаллах титаната висмута захват фотовозбуждённых с глубоких донорных центров носителей заряда на менее ловушки, характеризующиеся большим сечением фотоионизации, чем в исходном состоянии, считается основной причиной увеличения оптического поглощения [1, 2]. Другой причиной возрастания поглощения в кристаллах может являться индуцированная световым излучением генерация дефектов, для которых имеет место внутрицентровые переходы [2].

В данной работе представлены экспериментальные результаты исследования изменений в спектрах оптического поглощения в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca}$, подвергнутого начальной засветке коротковолновым излучением на длине волны $\lambda_i = 532$ нм, с последующей экспозицией более длинноволновым излучением с $\lambda_n = 596, 631, 633, 655, 871$ и 1064 нм. В экспериментах исследовался монокристаллический образец $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca}$, имеющий оптически полированные грани (100) и толщину $0,15$ см. Изменения в спектрах оптического поглощения кристалла регистрировались с использованием спектрофотометра Genesys-2000 в

диапазоне 500 - 1000 нм после каждого этапа засветки, как излучением с $\lambda_i = 532$ нм, приводящим к состоянию с максимальным поглощением, так и для последующих стадий эксперимента, при экспозиции светом с большей длиной волны из диапазона $\lambda_n = 596 - 1064$ нм.

Получено, что на первом этапе эксперимента показатель поглощения $k(\lambda)$ кристалла $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca}$ после засветки в течение 30 минут излучением с интенсивностью около 500 мВт/см^2 и $\lambda_i = 532$ нм достигает максимальных значений во всём исследуемом спектральном диапазоне. Последующая экспозиция светом с длиной волны из диапазона 596 - 1064 нм приводит к уменьшению $k(\lambda)$ (рис. 1). Следует отметить, что минимальные значения $k(\lambda)$ наблюдаются при засветке кристалла излучением с $\lambda_n = 1064$ нм. Характерные зависимости, соответствующие максимальным изменениям $\Delta k(\lambda)$ в процессе экспозиции просветляющим излучением с $\lambda_n = 596, 655$ и 1064 нм кристалла, предварительно облучённого зелёным светом, представлены на рис. 2. Данные зависимости демонстрируют резонансный характер с тремя максимумами при 542, 702 и 837 нм.

В отличие от данных, полученных для кристалла $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Al}$ [3], величина максимального просветления кристалла $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca}$ монотонно возрастает с длиной волны вызывающего его излучения во всём исследованном спектральном диапазоне.

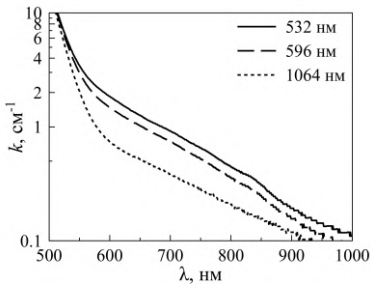


Рис. 1. Зависимость показателя поглощения $k(\lambda)$ после засветки

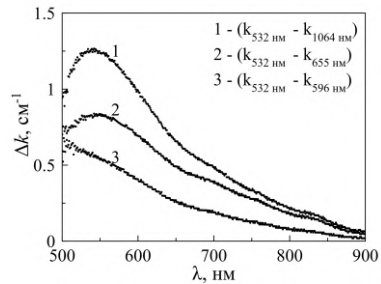


Рис. 2. Максимальные изменения показателя поглощения $\Delta k(\lambda)$

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Госзадания FEWM-2020-0038/3 на 2020-2022 годы.

Список литературы

1. Marinova V., Lin S.H., et al. // J. Opt. A – Pure Appl. Opt. 2003. V. 5 (6). P. S500.
2. Кистенева М.Г. и др. // Квантовая электроника. 2015. Т. 45(7). С. 685-690.
3. Dyu V.G., Kisteneva M.G., Shandarov S.M., et al. // Physics Procedia. 2015. V. 73. P. 131-135.

Ш.Б. УТАМУРАДОВА, С.А. МУЗАФАРОВА¹,
А.М. АБДУГАФУРОВ

*НИИ физики полупроводников и микроэлектроники при НУУз, Ташкент,
Узбекистан*

¹*Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз, Ташкент,
Узбекистан*

ПРОЗРАЧНЫЕ ПРОВОДЯЩИЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ

Приведены результаты экспериментов по формированию тонких оксидных плёнок SnO₂, CdO и ITO, полученные магнетронным ионным распылением. Авторами показано, что с увеличением удельной мощности разряда и удельного сопротивления, коэффициент адсорбции уменьшается примесями.

Sh.B. UTAMURADOVA, S.A. MUZAFAROVA¹,
A.M. ABDUGAFUROV

*Research Institute of Physics of Semiconductors and Microelectronics
at NU Uzbekistan, Tashkent*

¹*Physical-Technical Institute of SPA «Physics-Sun» Uzbekistan Academy of Science,
Tashkent*

TRANSPARENT CONDUCTIVE COATINGS BASED ON METAL OXIDES

The results of experiments on the formation of thin oxide films of SnO₂, CdO and ITO obtained by magnetron ion sputtering are presented. The authors have shown that with an increase in the specific discharge power and resistivity, the adsorption coefficient decreases with impurities.

Прозрачные проводящие покрытия (ППП) представляют собой различные тонкоплёночные материалы, которые обладают высокой электропроводностью и хорошей оптической прозрачностью. Большинство из них – бинарные соединения (In₂O₃, ZnO, SnO₂ и CdO), содержащие один металлический элемент. В стехиометрическом составе данные соединения являются диэлектриками, однако, из-за большого количества внутренних дефектов, которые выражаются в наличии кислородных вакансий или в присутствии межузельных атомов металла, они могут становиться полупроводниками с широкой запрещённой зоной ($E_g > 3 \text{ эВ}$) [1]. Высокая проводимость PPP ($n = 10^{19} \dots 10^{21} \text{ см}^{-3}$) обеспечивается введением примесных атомов [2].

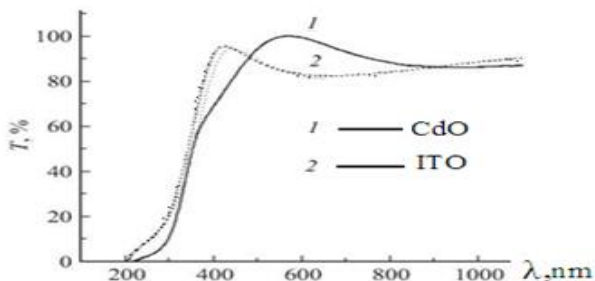


Рис. 1. Спектры пропускания плёнок CdO (1) и ITO (2), нанесённых на кварцевые подложки

Помимо высокой проводимости ППП имеют также хорошую оптическую прозрачность (коэффициент пропускания $T > 80\%$) в видимой и ближней инфракрасной области электромагнитного спектра. Следовательно, окно пропускания ППП находится в диапазоне $\lambda = (400 \dots 1500)$ нм. Это объясняется тем, что в области длинных волн ($\lambda > 1500$ нм) свет отражается в результате появления плазменного края, когда частота света ω совпадает с частотой коллективных колебаний носителей заряда в материале (плазменная частота ω_p). В то время как светопередача в ближнем ультрафиолете ($\lambda < 350$ нм) ограничена запрещённой зоной, поскольку фотоны с энергией $\hbar\omega > E_g$ поглощаются.

Двуокись олова SnO_2 , может быть получена как в форме диэлектрика, так и в виде полупроводника с шириной запрещённой зоны $\sim 3,7$ эВ с большой прозрачностью (80 %) с коэффициентом преломления 1,87 - 1,89 [2]. Слои ITO ($\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2$) отличаются хорошей электропроводностью ($\rho \approx 2 \cdot 10^{-4}$ Ом·см) достаточно прозрачны во всём диапазоне длин волн видимого света (80 - 90 %). Спектры пропускания плёнок CdO и ITO представлены на рис. 1. Экспериментально методом магнетронного ионного распыления получены прозрачные проводящие слои окислов индия и олова. Авторами также показано, что с увеличением удельной мощности разряда и удельного сопротивления, коэффициент адсорбции уменьшается примесями.

Список литературы

1. Batzill M., Diebold U. The surface and materials science of tin oxide // Progress in Surface Science. 2005. V. 79. P. 47-154.
2. Stadler A. Transparent conducting oxides – an up-to-date overview // Materials. 2012. N 5. P. 661-683.

И.А. КАПЛУНОВ, В.Е. РОГАЛИН¹, Г.И. КРОПОТОВ²,
А.А. ШАХМИН², С.А. ТРЕТЬЯКОВ

Тверской государственный университет, Тверь

¹*Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург*

³*ООО «Тидекс», Санкт-Петербург*

ОПТИЧЕСКОЕ ПРОПУСКАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ ПАРАТЕЛЛУРИТА

Приведены результаты измерения оптического пропускания монокристаллов в широком спектральном диапазоне: от 0,185 до 3000 мкм. Исследовали четыре вида монокристаллов, полученных разными производителями. Исследуемые образцы готовились с кристаллографической ориентацией [001], [110] и [100]. Установлен разброс в пропускании в видимом, УФ и ближнем ИК-диапазонах, который составлял ~ 0,5 - 4,0 %, а в диапазоне 400 - 3000 мкм разброс был ~ 3 - 17 %.

I.A. KAPLUNOV, V.E. ROGALIN¹, G.I. KROPOTOV²,
A.A. SHAHMIN², S.A. TRET'YAKOV

Tver State University

¹*Institute of Electrophysics and Electric Power Engineering of the RAS, Saint-Petersburg*

²*Tydex, LLC, Saint-Petersburg*

OPTICAL TRANSMISSION OF THE PARATELLURITE SINGLE CRYSTALS

The results of measuring the optical transmission of single crystals in a wide spectral range: from 0.185 to 3000 μm are presented. Four types of single crystals obtained by different manufacturers were investigated. The samples under study were prepared with crystallographic orientations [001], [110], and [100]. We established the spread in transmission in the visible, UV and near-IR ranges, which was ~ 0.5 - 4.0 %, and in the range of 400 - 3000 μm the spread was ~ 3 - 17 %.

Наиболее востребованным кристаллом для создания многочисленных устройств акустооптики (дефлекторы, модуляторы, фильтры, линии задержки и др.) является парателлурит. Эффективность использования обеспечивается уникальностью физических свойств парателлурита, что обусловлено редкой комбинацией материальных констант (в первую очередь, рекордным в диапазоне 0,35 - 5,5 мкм коэффициентом акустооптического качества M_2). Актуальным является применение парателлурита на длине волны 355 нм (вблизи собственного

фундаментального края оптического поглощения). Активно развивающаяся в настоящее время терагерцовая оптика также требует материала акустооптики соответствующего спектрального диапазона. Несмотря на существенные достижения в технологии получения парателлурита, оптические свойства материала (прежде всего, спектральное пропускание/поглощение, рассеяние излучения) могут отличаться, что связано с наличием дефектов разной природы, генерирующихся в процессе выращивания кристаллов.

Для образцов из парателлурита, выращенных из расплава, снимались спектры пропускания в диапазоне длин волн 0,185 - 3000 мкм. Для оценки возможности влияния ориентации монокристаллов, образцы готовили в направлениях [001] (оптическая ось), [110] и [100], толщина образцов составляла 5,21 мм. Исследовали образцы из кристаллов, выращенные в лаборатории из сырья чистотой ОСЧ и ХЧ, а также исследовали кристаллы китайского и Ужгородского производства. Для монокристаллов выполняли расчёт коэффициента поглощения с использованием спектральных зависимостей коэффициента отражения, полученного на изготовленных клиновидных образцах соответствующей ориентации.

Спектры пропускания образцов кристаллов из сырья ОСЧ и китайского производителя (К) представлены на рис. 1.

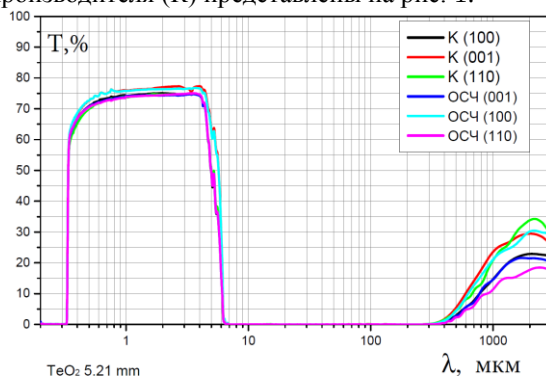


Рис. 1. Спектры пропускания образцов кристаллов

В диапазоне длин волн 0,35 - 5,0 мкм зафиксирован разброс в пропускании образцов, который составляет ~ 0,5-4,0 %, а в диапазоне 400 - 3000 мкм разброс составлял ~ 3 - 17 %.

Работа выполнена в рамках государственного задания по научной деятельности № 0057-2019-0005 и № 0817-2020-0007 с использованием ресурсов ЦКП ТвГУ и предприятия Тидекс.

С.А. ТРЕТЬЯКОВ, И.А. КАПЛУНОВ, А.М. ИВАНОВ,
С.В. МОЛЧАНОВ, В.С. СТЕПАНОВ

Тверской государственный университет

ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА ПОЛИРОВАННЫЕ ПОВЕРХНОСТИ МОНОКРИСТАЛЛОВ ПАРАТЕЛЛУРИТА

Изготовлены светозвукопроводы из монокристаллов парателлурита согласно чертежам реальных акустооптических устройств. Образцы подверглись отжигу при температурах: 100, 200, 300 и 550 °С. Проведены профилометрические исследования полированных поверхностей и измерено пропускание на длине волны 534 нм до и после отжига. Получены результаты изменений параметров шероховатости профиля поверхности и коэффициента пропускания.

S.A. TRETIKOV, I.A. KAPLUNOV, A.M. IVANOV,
S.V. MOLCHANOV, V.S. STEPANOV

Tver State University

INFLUENCE OF ANNEALING ON POLISHED SURFACES OF PARATELLURITE SINGLE CRYSTALS

The elements manufactured of single crystals of paratellurite according to the drawings of real acousto-optic devices. The samples annealed at temperatures of 100, 200, 300, and 550 °C. Profilometric studies carried out of polished surfaces; the transmission measured at a wavelength of 534 nm – before and after annealing. Results obtained on the changes parameters of roughness surface and coefficient transmittance.

Светозвукопроводы из монокристаллов парателлурита широко применяются в акустооптических устройствах. Одним из актуальных вопросов при изготовлении оптических элементов, является вопрос обработки поверхностей. В следствии шероховатости оптических поверхностей, происходят процессы диффузного рассеяния света, что приводит к уменьшению разрешающей способности устройств. Механические напряжения в приповерхностных слоях являются причинами возможного открепления пьезоэлемента при работе на больших мощностях, в следствии неравномерного нагрева, а также формированию наведённых оптических аномалий, что сказывается на работе приборов с качественной точки зрения.

Одним из технологических приёмов после выращивания монокристаллов парателлурита является процесс отжига при

температурах выше 650 °С, производящийся для снятия ростовых напряжений, однако отжиг готовых элементов при такой температуре является неприемлемым, так как миграция дислокаций внутри материала и активные процессы массопереноса на поверхности приводят к ухудшению поверхности.

Целью настоящей работы было провести отжиги готовых элементов из парателлурита при относительно малых значениях температур и оценке влияния данных процессов на значения параметров шероховатости поверхности и коэффициента пропускания. Образцы отжигались при температурах 100, 200, 300 и 550 °С в муфельной печи в течение 20 часов при скоростях нагрева и охлаждения 0.5 °С/мин, профилометрические исследования поверхностей производились с помощью оптического интерференционного профилометра NanoMap WLI1000 и программного обеспечения MountainsLab, пропускание измерялось с помощью обычной схемы с лазером и измерителем мощности излучения, так как данные элементы невозможно было разместить в спектрометре из-за геометрических особенностей. Поверхность образца отожжённого при температуре 550 °С сильно деградировала, значения перепадов высот составляли от 2 до 15 мкм, поэтому в дальнейшем исследовании не рассматривались. Результаты измерений частично представлены в табл. 1, где S_a – среднеарифметические высоты трёхмерной поверхности, R_a – среднеарифметическое отклонение двумерного профиля, R_{Sm} – средняя ширина элементов профиля, T – пропускание.

Таблица 1

	S_a , нм	R_a , нм	R_{Sm} , мкм	T , %
Без отжига	1,087	0,3936	25,87	70,8
100 °С	1.130	0.5196	25,58	70,45
200 °С	0.832	0.3706	32.97	70,65
300 °С	1.046	0.3280	27.03	66,5

По полученным результатам были сделаны выводы, что зависимость значений параметров шероховатости поверхности от температуры отжига является не только нелинейной, но и имеет точки экстремума; наибольший интерес для дальнейших исследований представляет отжиг при температурах близких к значению 200 °С, так как в этом диапазоне наблюдается уменьшение параметров шероховатости и увеличение размеров элементов поверхности.

Е.Н. КОТЛИКОВ, Н.П. ЛАВРОВСКАЯ, А.Н. ТРОПИН
*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического
приборостроения*

МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СПЕКТРОДЕЛИТЕЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА СПЕКТРА

Описан синтез металлодиэлектрических спектроделительных покрытий для инфракрасного диапазона спектра. Их особенностью является то, что для блокирования длинноволнового излучения используются металлические плёнки. Приведены результаты синтеза спектроделительного покрытия с пропусканием в области до 4.5 мкм и блокированием излучения на длинах волн более 5 мкм.

E.N. KOTLIKOV, N.P. LAVROVSKAYA, A.N. TROPIN
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

METAL-DIELECTRIC SPECTRAL-SEPARATION COATINGS FOR THE INFRARED RANGE OF THE SPECTRUM

The synthesis of metal-dielectric spectral-separation coatings for the infrared range of the spectrum is described. Their feature is that metal films are used to block long-wave radiation. The results of the synthesis of a spectral-separation coating with transmission in the region up to 4.5 microns and blocking of radiation at wavelengths exceeding 5 microns are presented.

Спектроделительные покрытия широко применяются в различных областях оптики, приборостроения, оптоэлектроники [1 - 3]. Они позволяют выделять требуемый диапазон спектра ($\Delta\lambda$) и блокировать пропускание в остальной области спектра. В инфракрасном диапазоне спектра. Спектроделители выполняются либо в виде поглощающего светофильтра, либо в виде набора зеркальных покрытий. Синтез таких покрытий не представляет трудностей и хорошо известен в литературе [2, 3]. Однако, для создания заградительного покрытия в дальней ИК-области спектра требуется изготовить сложные структуры, состоящие из достаточно толстых плёнок. Их изготовление может существенно повышать стоимость изделий. В настоящей работе предлагается синтезировать интерференционную структуру с поглощающими металлическими плёнками. Такая структура позволит блокировать излучение в длинноволновой области спектра [4].

Рассмотрим процесс синтеза такой структуры. В качестве исходной используется диэлектрическое зеркало на длину волны 6 мкм со структурой ПВНВНВНВНВ0.5Н. Здесь В – высокопреломляющая плёнка Ge, Н – низко преломляющая плёнка Al_2O_3 , П – подложка. Оптические толщины даны в долях $\lambda_0/4$, $\lambda_0 = 6$ мкм. На рис. 1 (кривая 1) приведён спектр пропускания такой структуры. На длине волны 3 мкм плёнка соответствует полуволновой плёнке и пропускание максимальное. На длине волны 6 мкм пропускание минимальное. На следующем этапе плёнки Ge заменяются на структуры 0,5В 0,05М 0,5В, где М – плёнки никеля оптической толщины 0.05. Спектр пропускания полученной структуры показан на рис. 1 (кривая 2). На последнем этапе проводится оптимизация толщин всех плёнок с целью получения спектра пропускания в виде прямоугольника. Результаты оптимизации структуры приведены на рис. 1 (кривая 3).

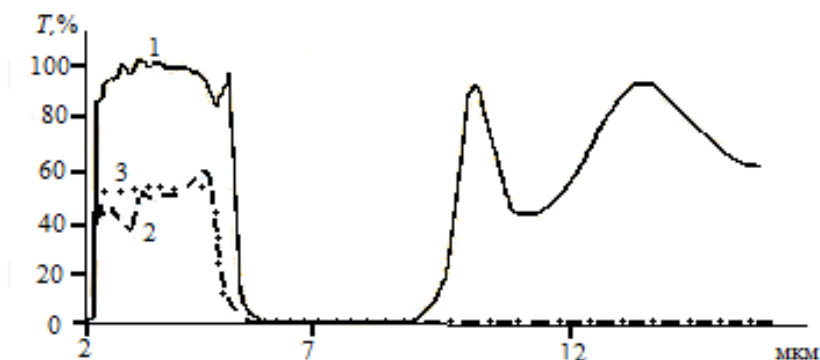


Рис. 1. Спектры синтезированных структур

Предлагаемые структуры позволяют получить спектроделительные покрытия, блокирующие длинноволновую область спектра.

Работа выполнена при финансовом участии Министерства образования и науки РФ, грант № FSRF-2020-0004.

Список литературы

1. Окатов М. А. Справочник технолога – оптика. СПб.: Политехника. 2004.
2. Котликов Е.Н., Новикова Ю.А., Тропин А.Н. Проектирование и изготовление интерференционных покрытий. СПб.: ГУАП. 2016.
3. Борисевич Н.А., Верещагин В.Г., Валидов М.А. Инфракрасные фильтры. Минск: Наука и техника. 1971.
4. Котликов Е.Н. // Оптический журнал. 2021. Т. 88. № 6. С. 45-47.

М.М. ВЕКШИН, В.А. НИКИТИН, Н.А. ЯКОВЕНКО

Кубанский государственный университет, Краснодар

РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИХ НАПРАВЛЕННЫХ ОТВЕТВИТЕЛЕЙ В СТЕКЛЕ ДЛЯ ДЛИНЫ ВОЛНЫ 1,55 мкм

Разработаны, изготовлены и исследованы интегрально-оптические элементы направленной связи с различным коэффициентом деления мощности для длины волны оптического излучения 1,55 мкм на основе волноводов, сформированных в стекле К-8 с применением технологии термического ионного обмена $\text{Ag}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$ с последующим электростимулированным заглублением канала.

М.М. VEKSHIN, V.A. NIKITIN, N.A. YAKOVENKO

Kuban State University, Krasnodar

DESIGN AND FABRICATION OF INTEGRATED-OPTIC DIRECTIONAL COUPLERS IN GLASS FOR WAVELENGTH 1,55 MICROMETER

Integrated-optic directional couplers with various splitting ratio for working wavelength 1,55 μm , based on waveguides formed in glass K-8 by use of the technology of thermal ion exchange with subsequent electric-field-assisted waveguide burial, have been designed, fabricated and studied.

Направленный ответвитель – один из основных интегрально-оптических элементов, применяемый для передачи, обработки и разделения сигналов. Актуальность создания таких ответвителей в настоящее время обусловлена как их применением в оптических системах связи и сенсорных устройствах, так и использованием для научных исследований в области квантовой криптографии и квантовых оптических вычислений [1]. Цель работы состоит в расчёте и изготовлении волноводных элементов направленной связи в стекле К-8 методом ионного обмена, функционирующих на длине волны 1,55 мкм.

Основой для разработки направленных ответвителей является выбор расстояния между каналами и необходимой длины связи, обеспечивающими требуемое разделение мощности сигналов, при этом необходимо учитывать, что эффект направленной связи будет проявляться частично и в области сближения волноводных S - изгибов. Также для создания направленного ответвителя необходимо провести выбор оптимального изгиба S - образного волновода по критерию

наименьшего затухания при заданном расстоянии между каналами на входе и выходе ответвителя. Минимальное затухание определяется с учётом компромисса между радиационными потерями на изгибах и потерями в материале волновода – с одной стороны большой радиус кривизны обеспечит низкие радиационные потери, но по причине собственных потерь волновода следует изготавливать устройство достаточно коротким. Также при расчётах, проведённых методом распространяющегося пучка, было отмечено, что направленный ответвитель является устройством, критичным к технологическим допускам – особенно это касается допусков на точность переноса чертежа схемы на маску подложки. Как показали расчёты, отклонение величины расстояния между параллельными каналами от заданного существенно влияет на перераспределение мощности на выходе ответвителя, причём это влияние сильнее, чем аналогичное влияние от допусков на другие технологические параметры.

С учётом указанных соображений, были спроектированы направленные ответвители на основе одномодовых волноводов в стекле К-8 с применением технологии термического ионного обмена $\text{Ag}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$ с последующим электростимулированным заглублением канала. Для переноса чертежа волноводной схемы на стеклянную подложку использовалась установка безмасковой литографии Heidelberg $\mu\text{PG 101}$.

Геометрические параметры ответвителей: расстояние между каналами в области максимального сближения составляет 15 мкм, S-изгибы ответвителя имеют радиус кривизны 35 мм. Технологические параметры волноводов подобраны для реализации одномодового режима с эффективным диаметром поля моды 10 мкм на длине волны 1,55 мкм для их стыковки с телекоммуникационными волоконными световодами. Были изготовлены ответвители с различной длиной связи. В ходе экспериментальных исследований изготовленных образцов были получены элементы направленной связи с различными коэффициентами деления мощности. Трёхдецибельное деление мощности происходит при длине связи, равной 2,2 мм. Измеренные размеры поля моды волноводов ответвителя составили $11,4 \times 10,4$ мкм при его гауссовой аппроксимации. Таким образом, разработаны, изготовлены и исследованы интегрально-оптические направленные ответвители в стекле К-8 на основе волоконно-совместимых волноводов для рабочей длины волны 1,55 мкм.

Список литературы

1. Righini G.C., Liñares J. Active and quantum integrated photonic elements by ion exchange in glass // Applied Sciences. 2021. V. 11. P. 5222.

И.О. ЗОЛОТОВСКИЙ, В.А. ЛАПИН, Д.И. СЕМЕНЦОВ
Ульяновский государственный университет

УСИЛЕНИЕ И КОМПРЕССИЯ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ ИМПУЛЬСОВ В АКТИВНОМ НЕОДНОРОДНОМ СВЕТОВОДЕ

Исследуется динамика распространения частотно-модулированного импульса, распространяющегося в активном световоде с профилем зависимости дисперсии специально подобранным для обеспечения максимальных степеней сжатия.

I.O. ZOLOTOVSKII, V.A. LAPIN, D.I. SEMENTSOV
Ulyanovsk State University

AMPLIFICATION AND COMPRESSION OF FREQUENCY MODULATED PULSES IN AN ACTIVE INHOMOGENEOUS FIBER

The dynamics of propagation of a frequency-modulated pulse propagating in an active fiber with a dispersion profile specially selected to ensure maximum compression ratios is investigated.

В работе рассматривается методика усиления и временной компрессии частотно-модулированных импульсов в активном световоде с профилем зависимости дисперсии от длины подобранным таким образом, что бы обеспечивать максимальные степени сжатия импульсов с заданным начальным чирпом при заданном усилении световода.

Динамика временной огибающей ВП описывается уравнением для амплитуды огибающей вида НУШ [1, 2]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} - i \frac{d_2(z)}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial \tau^2} + iR|A|^2 A = gA, \quad (1)$$

где $\tau = t - z/v_g$ – время в бегущей системе координат, $d_2 = (d^2\beta/d\omega^2)$ – параметр дисперсии групповых скоростей (ДГС), R – параметр нелинейности, g – коэффициент усиления (потерь) в волокне.

При этом в работе выбиралась зависимость дисперсии вида:

$$d_2(z) = -|d_{20}| \exp \left[-\frac{\alpha_0 |d_{20}|}{g_0} (\exp(2g_0 z) - 1) + 2g_0 z \right]. \quad (2)$$

На рис. 1а приведены динамика ДГС и пиковой мощности, на рис. 1б – профили импульса на входе, в точке максимума модуля дисперсии и на выходе из световода длиной $L = 1.5z_0$, где z_0 – точка максимума модуля дисперсии. В работе рассматривался частотно-модулированный импульс вида:

$$A(0, \tau) = \sqrt{P_0} \operatorname{sech}(\tau / \tau_0) \exp(i\alpha_0 \tau^2). \quad (3)$$

Приведённые зависимости получены путём численного решения уравнения (1) методом SSF [1]. При следующих значениях параметров импульса: начальная длительность $\tau_0 = 10^{-11}$ с, мощность $P_0 = 0.01$ Вт, чирп $\alpha_0 = 10^{24}$ с⁻²; и световода: ДГС $d_2 = -10^{-27}$ с²/м, параметр нелинейности $R = 10^{-3}$ (Вт·м)⁻¹, усиления: $g_0 = 0.1$ м⁻¹.

Видно, как по мере распространения импульса по участку волокна с возрастающей по модулю дисперсией и постоянным усилением наблюдается его незначительное временное сжатие, при, значительном (более чем в 100 раз) усилении. Затем на участке с убывающей по модулю ДГС происходит резкое сжатие импульса. При выбранных параметрах достигается увеличение пиковой мощности более чем на пять порядков.

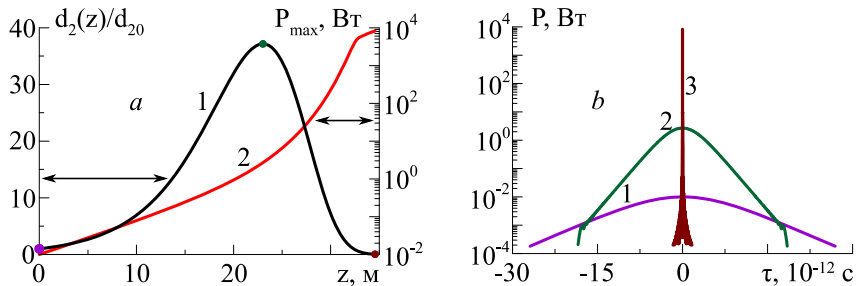


Рис. 1. Динамика ДГС (1), пиковой мощности (2) (а) и профили импульса на входе (1), в точке максимума модуля дисперсии (2), на выходе из световода (3) (b)

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-42-730013.

Список литературы

1. Золотовский И.О., Лапин В.А., Семенов Д.И., Столяров Д.А. // Оптика и спектроскопия. 2017. Т. 122. № 3. С. 490-497.
2. Zolotovskii I.O., Lapin V.A., Sementsov D.I., Fotiadi A.A., Popov S.V. // Optics Communications. 2018. V. 426. P. 333-340.

И.Р. ДРОЗДОВ¹, К.А. ОВЧИННИКОВ^{1,2}, Е.С. БОЙЧУК^{1,3},
В.В. КРИШТОП^{1,2,3}

¹Пермская научно-производственная приборостроительная компания

²Пермский государственный национальный исследовательский университет

³Пермский национальный исследовательский политехнический университет

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВЕТОВЫХ ВОЛН ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЯЮЩИХ ВОЛОКОН МЕТОДОМ ОПТИЧЕСКОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

Методом оптической рефлектометрии в частотной области проведено одновременное измерение длин двух оптических волокон с сохранением поляризации типа PANDA. Возникновение дополнительных к ожидаемым при проведении эксперимента пиков объяснено взаимодействием между собой двух пар медленных и быстрых мод, распространяющихся в двух оптических волокнах. Экспериментальные результаты согласуются с результатами предложенной модели.

I.R. DROZDOV¹, K.A. OVCHINNIKOV^{1,2}, E.S. BOYCHUK^{1,3},
V.V. KRISHTOP^{1,2,3}

¹Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company

²Perm State University

³Perm National Research Polytechnic University

POLARIZATION INTERACTIONS OF LIGHT WAVES IN TESTING OF BIREFRINGENT FIBERS BY OPTICAL FREQUENCY DOMAIN REFLECTOMETRY

The OFDR-method to simultaneous measurement of lengths of two PANDA-type polarization-maintaining fibers was used. The appearance of additional to those expected peaks during the experiment explained by the interaction between two pairs of slow and fast waves propagating in two optical fibers. The experimental results are consistent with the results of the proposed model.

Оптическая рефлектометрия в частотной области (OFDR) представляет интерферометрический метод измерений с использованием высококогерентного перестраиваемого лазерного источника. Обработывая полученный интерференционный сигнал преобразованием Фурье, можно измерить длину оптического волокна с высокой точностью [1].

Целью работы является объяснение возникновения дополнительных частотных пиков, полученных при одновременном измерении длин двух волокон типа PANDA. Известно, что при распространении оптического излучения в системе кристаллических пластин возможно возникновение некоторого количества обыкновенных и необыкновенных волн, которые могут при интерференции давать вклад в результирующий сигнал [2]; по аналогии с этим, нами выдвинуто предположение о том, что в измеряемых волокнах с длинами $L_1 = 502,094$ и $L_2 = 502,0$ м медленные и быстрые моды, распространяющиеся в одном волокне (F1, S1), могут интерферировать между собой и модами во втором волокне (F1, S1). Результат такого взаимодействия можно оценить по частоте биений электрического сигнала на фотоприёмнике, которую определяем при анализе сигнала с помощью быстрого преобразования Фурье (рис. 1).

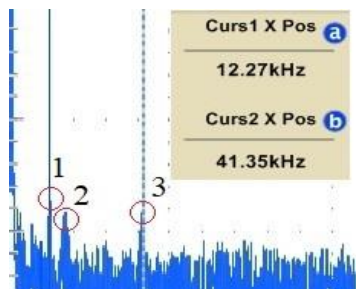


Рис 1. Спектр сигнала с фотоприёмника

Первый пик (12,27 кГц) на рис. 1 соответствует интерференции F1 и F2, а также S1 и S2. Третий пик (41,35 кГц) соответствует интерференции между S1 и F2. В этом случае время между распространением света в одном и втором волокне максимально, что соответствует максимальной разнице оптических путей, и, соответственно, максимальной частоте биений.

Интересно, что второй максимум (16,4 кГц), который соответствует взаимодействию F1 и S2, должен

наблюдаться на меньшей частоте биений, чем первый, так как он соответствует случаю, когда свет в первом (длинном) волокне приходит на фотоприёмник раньше, чем во втором (коротком) волокне. Из расчётов следует, что значение частоты должно быть отрицательным, то есть на экране осциллографа мы наблюдаем пик в положительной области, в действительности находящийся в отрицательной области частот, что является следствием отображения результата преобразования Фурье.

Отметим, что, когда неизвестна длина каждого волокна, можно, укорачивая на определённую величину одно из волокон, по направлению сдвига пиков определить, какое из двух оптических волокон длиннее.

Список литературы

1. Дроздов И.Р. и др. //Фотон-экспресс. 2021. №. 6 (174). С. 332-333.
2. Лопатина П.С. и др. //Оптика и спектроскопия. 2012. Т. 113. № 2. С. 219-221.

И.В. БОГАЧКОВ

Омский государственный технический университет

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА – БРИЛЛЮЭНА В РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

Представлена методика получения спектральных характеристик рассеяния Мандельштама – Бриллюэна при известных распределениях акустических мод в одномодовых оптических волокнах.

I.V. BOGACHKOV

Omsk State Technical University

FINDING FREQUENCY CHARACTERISTICS OF MANDELSTAM – BRILLOUIN SCATTERING IN VARIOUS TYPES OF OPTICAL FIBERS

A technique for obtaining the spectral characteristics of Mandelstam – Brillouin scattering with known acoustic mode distributions in optical fibers is presented.

Отличия зависимостей акустических мод низших порядков при взаимодействии оптической и гипер акустической волн оказывают существенное влияние на характеристики рассеяния Мандельштама – Бриллюэна (РМБ) (величину бриллюэновского сдвига частоты, на количество «пигов», их уровень и т.п.) [1, 2]. Для получения частотных характеристик РМБ одномодовых оптических волокон (ОВ) необходимо построить частотные зависимости коэффициентов затухания и продольных акустических скоростей. Это позволит определить вклад каждой из акустических мод в итоговую частотную характеристику РМБ.

На рис.1 показана последовательность действий, позволяющая получить частотную характеристику РМБ $s(f)$ для ОВ со смещённой дисперсией G.653 (DSF). По оси частот f величины указаны в ГГц.

В каждом из этих рисунков сначала на первом (верхнем) графике показаны частотные зависимости скоростей $v_j(f)$ акустических мод низших порядков. Прямая линия, пересекающая их $(k(f) = (\lambda_L/n_1) \cdot f)$, построена из условия «синхронизма», при котором происходит обращение волнового фронта ($k_A = 4\pi n_1/\lambda_L$, n_1 - эффективный показатель преломления среды). Точки пересечения определяют частоты «пигов» каждой моды f_j . На втором графике приведены частотные зависимости

потерь ($z_i(f)$, 1/м) акустических мод, которые позволяют определить их коэффициенты затухания (на f_j) [1, 2]. На третьем графике показаны частотные характеристики вклада каждой акустической моды $s_i(f)$ с учётом затухания. На четвёртом (нижнем) графике представлена итоговая частотная характеристика (спектр) РМБ.

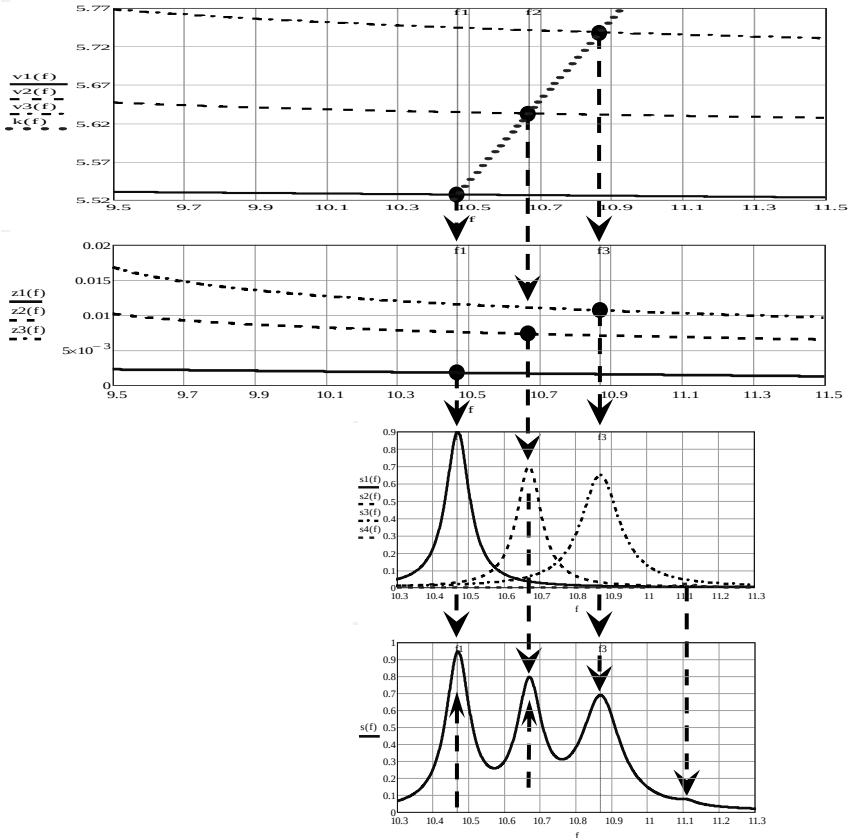


Рис. 1. Влияние частотных характеристик низших акустических мод на формирование итогового спектра РМБ в ОВ-G.653

Список литературы

1. Богачков И.В. Определение профиля спектра рассеяния Мандельшта – Бриллюэна в оптических волокнах различных видов // Вестник СибГУТИ. 2021. Вып. 2. С. 88-99.
2. Богачков И.В., Горлов Н.И. Построение частотной характеристики рассеяния Мандельшта – Бриллюэна в оптических волокнах различных видов // Динамика систем, механизмов и машин. 2021. Т. 9. № 5.

В.В. ДОРОФЕЕВ^{1,2}, С.Е. МОТОРИН¹, А.Р. ШАРАФЕЕВ³,
В.В. КОЛТАШЕВ⁴, С.В. ФИРСТОВ⁴

¹*Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Десятых РАН,
Нижний Новгород*

²*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород*

³*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского*

⁴*Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова ИОФ РАН, Москва*

АКТИВИРОВАННЫЕ Er^{3+} И Tm^{3+} ВЫСОКОЧИСТЫЕ ТЕЛЛУРИТНЫЕ СТЕКЛА И ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ

Синтезированы высокочистые теллуридные стекла, легированные оксидами эрбия или тулия. Из стекол изготовлены двухслойные преформы и волоконные световоды со ступенчатым профилем показателя преломления и модифицированной оксидом висмута сердцевиной. Экспериментально исследованы оптические свойства образцов стекол, включая люминесцентные; оптические потери и эмиссионные характеристики волокон в ИК-области.

V.V. DOROFEEV^{1,2}, S.E. MOTORIN¹, A.R. SHARAFEEV³,
V.V. KOLTASHEV⁴, S.V. FIRSTOV⁴

¹*Devyatykh Institute of Chemistry of High-Purity Substances of the RAS, Nizhny Novgorod*

²*Institute of Applied Physics of the RAS, Nizhny Novgorod*

³*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod*

⁴*Dianov Fiber Optics Research Center of Prokhorov General Physics Institute of the RAS,
Moscow*

HIGH-PURITY TELLURITE GLASSES AND FIBERS ACTIVATED WITH Er^{3+} AND Tm^{3+}

High-purity tellurite glasses doped with erbium or thulium oxides were synthesized. Two-layer preforms and step index fibers with cores modified with bismuth oxide were made of glass. Optical properties of glass samples, including luminescent ones; optical loss and emission characteristics of fibers in the IR region were experimentally investigated.

Специально разработанные составы стекол на основе диоксида теллура позволяют изготавливать волоконные световоды с низкими оптическими потерями и возможностью лазерной генерации в ИК-области [1, 2]. Такие стекла характеризуются высокими устойчивостью против кристаллизации и прозрачностью в инфракрасной области, хорошей растворимостью редкоземельных оксидов [3, 4].

Стеклообразующие расплавы получали плавлением смеси исходных оксидов в платиновых тиглях внутри герметичного реактора из кварцевого стекла в атмосфере очищенного кислорода [3, 5]. Волоконные световоды изготавливались вытяжкой предварительно растянутой палочки из двухслойной преформы внутри жакетирующей трубки с последующим нанесением защитного полимерного покрытия (рис. 1).

Стёкла обладают высокой прозрачностью в диапазоне длин волн 0,4-5,2 мкм. При накачке на 0,975 мкм наблюдаются полосы люминесценции ионов Er^{3+} вблизи 1,6 и 2,7 мкм, соответствующие переходам ${}^4\text{I}_{13/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ и ${}^4\text{I}_{11/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2}$. При накачке на 0,8 мкм наблюдаются полосы люминесценции ионов Tm^{3+} вблизи 1,46, 1,8 и 2,3 мкм, соответствующие переходам ${}^3\text{H}_4 \rightarrow {}^3\text{F}_4$, ${}^3\text{F}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$ и ${}^3\text{H}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_5$. Лучшие из измеренных времен жизни возбуждённых уровней иона Er^{3+} составляют 8 - 11 мс и 230 - 240 мкс для ${}^4\text{I}_{11/2}$ и ${}^4\text{I}_{13/2}$.

Оптические потери в волоконных световодах в диапазоне 1,2 - 2,7 мкм вне полос поглощения РЗИ менее 0,8 дБ/м. Эмиссионные спектры волокна с активированной Er^{3+} сердцевиной представлены на рис. 2.

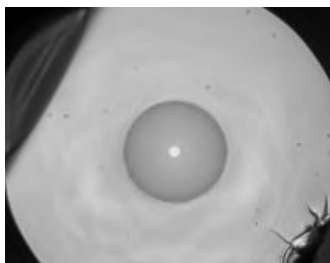


Рис. 1. Фотография торца волокна с сердцевиной диаметром 10 мкм и двумя оболочками диаметрами 90 и 300 мкм

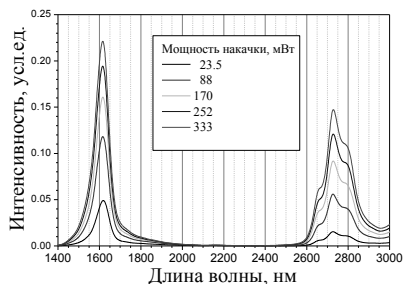


Рис. 2. Спектры люминесценции волокна с легированной Er^{3+} сердцевиной при накачке 975 нм

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 20-03-00874).

Список литературы

1. Tao G., et al. // Adv. Opt. Photonics. 2015. V. 7. P. 379-458.
2. Anashkina E.A., et al. // Fibers. 2020. V. 8. P. 30.
3. Moiseev A.N., et al. // Opt. Mater. 2011. V. 33. P. 1858-1861.
4. Jha A., et al. // Prog. Mater. Sci. 2012. V. 57. P. 1426-1491.
5. Dorofeev V.V., et al. // Journal of Non-Cryst. Sol. 2011. V. 357. P. 2366-2370.

И.В. БОГАЧКОВ

Омский государственный технический университет

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ РАСТЯГИВАЮЩИХ НАГРУЗОК НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

В работе проводится анализ влияния продольных растягивающих сил на долговечность оптических волокон. Результаты представляют интерес для обеспечения эффективного функционирования проложенных оптических кабелей.

I.V. BOGACHKOV

Omsk State Technical University

IMPACT ASSESSMENT OF LONGITUDINAL TENSILE LOADS ON THE DURABILITY OF OPTICAL FIBERS

The impact analysis of longitudinal tensile forces on the durability of optical fibers is presented in this work. The results are of interest for ensuring the effective functioning of the laid optical cables.

Обеспечение бесперебойной работы волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) требует совершенствования систем мониторинга для заблаговременного выявления потенциально ненадёжных участков в оптических волокнах (ОВ), находящихся в проложенных оптических кабелях (ОК), которые с течением времени могут нарушить нормальную работу ВОЛС [1]. К таким участкам, например, можно отнести ОВ, имеющие повышенное механическое натяжение [1].

Для того, чтобы ВОЛС работала безотказно в течение всего срока эксплуатации, необходимо, чтобы в ОК отсутствовали механические напряжения, приводящие к продольным натяжениям ОВ более 0.2 %. Увеличение натяжения ОВ напрямую влияет на показатели надёжности ВОЛС, а именно, – на её долговечность.

Как известно, ожидаемый срок службы ОК составляет 25 лет.

Чтобы этот срок не изменился в меньшую сторону, растягивающее воздействие не должно приводить к натяжениям более 0.2 %.

Если величина натяжения достигнет значения 0.45 %, то с вероятностью 50 % произойдет обрыв ОВ [1, 2].

Представляет особый интерес оценка влияния механических продольных растяжений ОВ в проложенном ОК на долговечность ВОЛС.

По полученным результатам построен график зависимости долговечности ОВ от величины продольного натяжения, представленный на рис. 1.

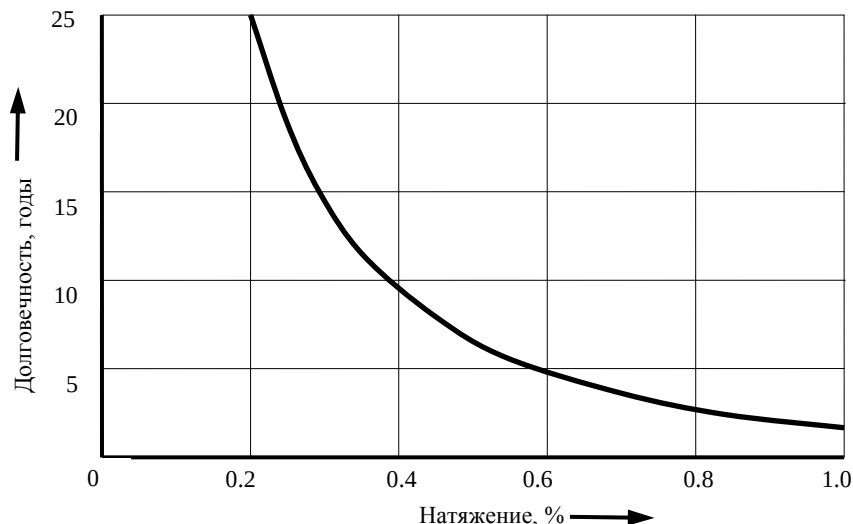


Рис. 1. График зависимости долговечности ВОЛС от величины продольного натяжения ОВ

По графику можно определять как долговечность ОВ от величины натяжения, так и рассматривать необходимую величину натяжения ОВ при заданной долговечности. При натяжении ОВ на уровне 0.2 % срок службы ВОЛС составил 25 лет. При увеличении натяжения ОВ до уровня 0.33 %, срок службы ОВ составил 13 лет. Дальнейшее увеличение натяжения до значения 0.45 % привело к снижению срока службы ВОЛС до 8 лет [1, 2]. На основании проведённых оценок по моделям, рассмотренным в работах [1, 2], можно оценить влияние изменения натяжения ОВ на показатели надёжности функционирования ВОЛС.

Список литературы

1. Лутченко С.С., Богачков И.В. Влияние натяжения оптического волокна на коэффициент готовности ВОЛС // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2018. Т. 9. № 2. С. 125-130.
2. Лутченко С.С., Копытов Е.Ю., Богачков И.В. Оценка надёжности ВОЛС с учётом влияния внешних факторов // Динамика систем, механизмов и машин. 2017. Т. 5. № 4. С. 34-39.

Р.Е. ИЛЬИНСКИЙ

Лыткаринский завод оптического стекла, Московская обл.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ, ИСХОДЯЩЕГО
ОТ СКОШЕННОГО ТОРЦА ОДНОМОДОВОГО ВОЛОКНА,
МЕТОДОМ ГЕОМЕТРООПТИЧЕСКОЙ АНАЛОГИИ**

Определены параметры оптической системы из объектива и источника излучения с квазиламбертовой диаграммой направленности. Данная оптическая система формирует трёхмерное распределение освещённости, которое аналогично распределению интенсивности исходящего от скошенного торца одномодового волокна.

R.E. ILINSKY

Lytkarino Optical Glass Factory, Moscow region

**SIMULATION OF SPATIAL DISTRIBUTION
OF RADIATION EMITTING FROM OBLIQUE END FACE
OF SINGLE-MODE OPTICAL FIBER
BY THE GEOMETRO-OPTICAL ANALOGY METHOD**

The parameters of an optical system consisting of an objective and a radiation source with a quasi-Lambertian radiation pattern and forming a three-dimensional distribution of irradiance similar to the intensity of radiation emitting from oblique end face of single-mode optical fiber.

В фотометрических расчётах, при моделировании оптико-механических устройств, в трёхмерной компьютерной графике распространение оптического излучения достаточно часто моделируется набором лучей [1] с нанизанными на них определёнными долями потока излучения. При данном способе моделирования поток излучения, который падает на заданный участок поверхности, почти всегда принимается равным алгебраической сумме потоков излучений, нанизанных на те лучи, траектории которых пересекают заданный участок поверхности. Из-за алгебраического сложения потоков излучений дифракционные и интерференционные явления в этом случае игнорируются. Однако в [2] показано, что надлежащий выбор набора лучей и нанизанных на них потоков излучений обеспечивает моделирование дифракционных явлений на краю полуплоскости при алгебраическом сложении потоков излучений.

В работах [3, 4] показано, что одна или несколько систем, которые состоят из идеального объектива, излучающей площадки с квазиламбертовой диаграммой направленности и амплитудного фильтра, могут сформировать (при алгебраическом сложении потоков излучений) в каждой точке пространства плотность потока излучения, которая прямо пропорциональна квадрату модуля амплитуды гауссового или эрмит-гауссового пучка в этой точке. Для моделирования пространственного распределения исходящего от скошенного торца одномодового волокна излучения [5] в настоящей работе предлагается использовать аналогичную систему (рис. 1).

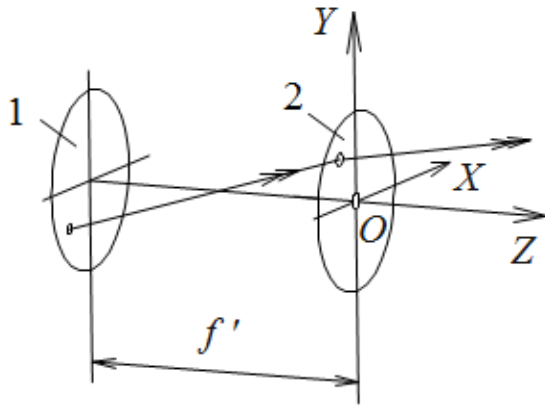


Рис. 1. Оптическая система: 1 – излучающая площадка с распределением яркости $L(x, y)$, 2 – идеальный объектив с фокусным расстоянием f' ; амплитудный фильтр с коэффициентом пропускания $P(x, y)$ расположен в плоскости OXY

Список литературы

1. Шикин А.В., Боресков А.В. Компьютерная графика. Полигональные модели. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2005.
2. Freniere E.R., Gregory G.G., Hassler R.A. // Proc. SPIE. 1999. V. 3780. P. 151-157.
3. Ильинский Р.Е. // Оптика и спектроскопия. 2003. Т. 97. № 1. С. 159-164.
4. Ильинский Р.Е. // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2013. № 4.
5. Kihm H., Kim S. // Opt. Lett. 2004. V. 29. P. 2366-2368.

И.В. БОГАЧКОВ

Омский государственный технический университет

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ НАТЯЖЕНИЯ
ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА НА ПОКАЗАТЕЛИ
НАДЁЖНОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ
СВЯЗИ**

Проведён анализ влияния степени натяжения оптических волокон на характеристики надёжности волоконно-оптических линий связи. Результаты представляют интерес для ранней диагностики физического состояния оптических волокон, находящихся в проложенных оптических кабелях.

I.V. BOGACHKOV

Omsk State Technical University

**EVALUATION OF THE INFLUENCE OF THE OPTICAL FIBER
STRAIN DEGREE ON THE RELIABILITY
OF THE FIBER-OPTIC COMMUNICATION LINE**

The influence of the strain degree of optical fibers on the reliability characteristics of fiber-optic communication lines is analyzed in this work. The results are of interest for early diagnostics of the physical condition of optical fibers located in the laid optical cables.

Для обеспечения бесперебойной и долговечной работы волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) необходима ранняя диагностика физического состояния оптических волокон (ОВ), которые находятся в проложенных оптических кабелях (ОК).

Участки ОК, проложенных с использованием подвесной технологии, могут испытывать значительные перепады температур. Например, температуры соседних участков ОК, один из которых находится под прямым солнечным светом, а другой – в тени, будут существенно различаться [1, 2]. Это может привести к необратимым изменениям в ОВ, связанным с появлением повышенных механических напряжений в ОВ из-за различия коэффициентов теплового расширения элементов ОК (ОВ, защитные элементы, оболочки ОК, средства крепежа, среда прокладки ОК и т.п.), что может значительно сократить срок службы ОК [3].

Безопасными будем считать натяжения ОВ менее 0.2 % (при этом ожидаемый срок службы ОК составляет 25 лет) [2]. При натяжении

порядка 1 % срок службы ОК снижается до 1 года [3]. Для анализа составляется граф состояний системы и матрица переходных вероятностей. Затем вычисляются показатели надёжности.

С помощью моделирования были получены графики зависимости функции коэффициента готовности от интервала времени эксплуатации $K_r(T)$ от степени натяжения ОВ, которые представлены на рис. 1. График «1» построен при отсутствии натяжения, график «2» – при опасном натяжении 1 %, график «3» – при уже критически опасной степени натяжении 5 %.

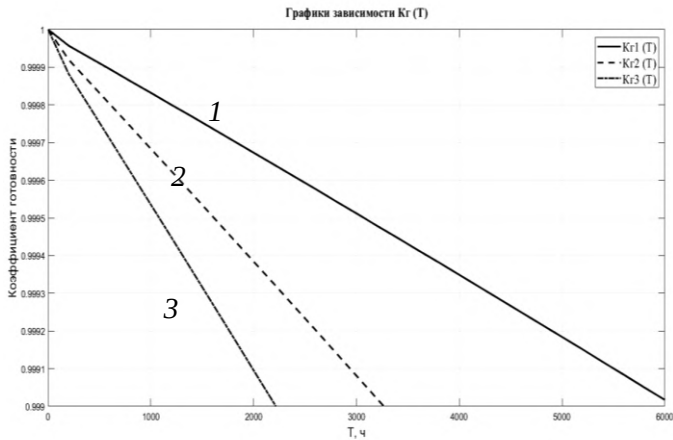


Рис. 1. Графики зависимости функции $K_r(T)$ от натяжения ОВ

На основании моделирования можно сделать вывод, что степень натяжения ОВ существенно влияет на показатели надёжности ВОЛС [1].

Таким образом, с помощью описанной модели можно производить оценку надёжности ВОЛС с учётом влияния различных внешних факторов и определять оптимальное время технического обслуживания.

Список литературы

1. Майстренко В.А., Богачков И.В., Копытов Е.Ю., Лутченко С.С. и др. Подход к расчёту комплексных показателей надёжности и периодичности технического обслуживания ВОЛС // Тр. Междунар. конф. АПЭП. Новосибирск, 2016. Т. 7. С. 73-78.
2. Лутченко С.С., Богачков И.В. Влияние натяжения оптического волокна на коэффициент готовности ВОЛС // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2018. Т. 9. № 2. С. 125-130.
3. Лутченко С.С., Богачков И.В. Моделирование влияния натяжения оптического волокна на показатели готовности волоконно-оптической линии связи // Динамика систем, механизмов и машин. 2019. Т. 7. № 4. С. 212-219.

А.С. АБРАМОВ, И.О. ЗОЛОТОВСКИЙ,
В.А. КАМЫНИН¹, В.А. ЛАПИН

Ульяновский государственный университет
¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

ВРЕМЕННАЯ КОМПРЕССИЯ ЧАСТОТНО- МОДУЛИРОВАННЫХ ИМПУЛЬСОВ В ПЕРИОДИЧЕСКИХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДАХ

Рассматривается динамика частотно-модулированных импульсов в световодах с последовательно вписанными решётками показателя преломления с различным периодом.

A.S. ABRAMOV, I.O. ZOLOTOVSKII,
V.A. KAMYNIN¹, V.A. LAPIN

Ulyanovsk State University
¹Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

TEMPORAL COMPRESSION OF FREQUENCY MODULATED PULSES IN PERIODIC FIBERS

The dynamics of frequency-modulated pulses in fibers with sequentially inscribed refractive-index gratings having a different period is considered.

В работе рассматривается динамика частотно-модулированных импульсов в волоконных световодах, обладающих последовательными решётками показателя преломления (ПП), с разным периодом.

В рассматриваемом волокне (рис. 1) зависимость показателя преломления от длины определяется выражением [1]:

$$n_i(z) = n_0 \left[1 - m \cos(2\pi z / \Lambda_i(z)) \right], \quad (1)$$

где n_0 – средний ПП волокна при отсутствии решётки, m – глубина модуляции ПП решётки, Λ_i – период решётки.

Динамика временной огибающей ВП описывается уравнением для амплитуды огибающей вида НУШ [2]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} - i \frac{\beta_2(z)}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial \tau^2} + \frac{\beta_3(z)}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial \tau^3} + iR \left(|A|^2 - \tau_R \frac{\partial |A|^2}{\partial \tau} \right) A = 0, \quad (2)$$

где $\tau = t - z/v_g$ – время в бегущей системе координат, $\beta_n = (d^n \beta / d\omega^n)$ – параметр дисперсии групповых скоростей (ДГС), R – параметр нелинейности.

В работе выбрана зависимость дисперсии вида [3]:

$$\beta_2(z) = -|\beta_{20}| \exp[-2\alpha_0 |\beta_{20}| z]. \quad (3)$$

В работе рассматривался частотно-модулированный импульс вида:

$$A(0, \tau) = \sqrt{P_0} \operatorname{sech}(\tau / \tau_0) \exp(i\alpha_0 \tau^2). \quad (4)$$

На рис. 2 приведены профили импульсов после прохождения рассматриваемого световода при значениях параметров импульса: начальная длительность $\tau_0 = 10^{-11}$ с, мощность $P_0 = 7.7 \cdot 10^3$ Вт, чирп $\alpha_0 = 10^{23} \text{ с}^{-2}$; и световода: ДГС $\beta_2(0) \approx -5 \cdot 10^{-23} \text{ с}^2/\text{м}$, $\beta_3(0) \approx -3.6 \cdot 10^{-35} \text{ с}^3/\text{м}$, параметр нелинейности $R = 10^{-3} (\text{Вт} \cdot \text{м})^{-1}$, $L = 0.19 \text{ м}$, $\tau_R \approx 5 \cdot 10^{-15} \text{ с}$ – время нелинейного отклика.

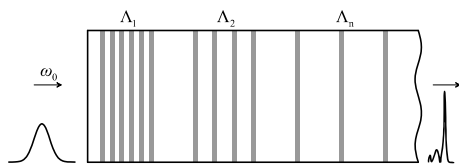


Рис. 1. Геометрия рассматриваемой структуры

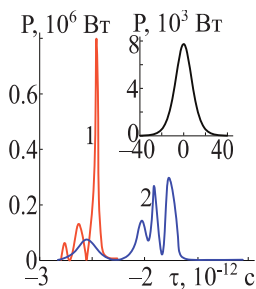


Рис. 2. Временные профили импульсов после сжатия при $m = (5; 1) \cdot 10^{-4} - (1, 2)$; врезка – исходный импульс

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-42-730013 и министерства образования и науки РФ, стипендия президента РФ, проект СП-4058.2021.5

Список литературы

1. Wolf A., Dostovalov A., Bronnikov K., Babin S. // Opt. Express. 2019. V. 27 (10). P. 13978.
2. Smirnov S.V., Kobtsev S.M., Kukarin S.V. // Opt. Express. 2015. V. 23 (4). P. 3914.
3. Abramov A.S., Zolotovskii I.O., Kamynin V.A., Lapin V.A. // Quantum Electron. 2021. V. 51 (2). P. 153.

И.В. БОГАЧКОВ

Омский государственный технический университет

КОМПЕНСАЦИИ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ БРИЛЛЮЭНОВСКИХ РЕФЛЕКТОГРАММ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

Рассмотрена возможность компенсации влияния температурных изменений на бриллюэновский сдвиг частоты и степень продольного натяжения при автоматизированной обработке бриллюэновских рефлектограмм одномодовых оптических волокон.

I.V. BOGACHKOV

Omsk State Technical University

A COMPENSATION OF THE TEMPERATURE CHANGE INFLUENCE IN THE PROCESSING OF BRILLOUIN REFLECTOGRAMS OF OPTICAL FIBERS

The possibility of compensating the temperature change influence on the Brillouin frequency shift and the longitudinal strain degree of during automated processing of Brillouin reflectograms of single-mode optical fibers is considered in this work.

Для выявления смещения бриллюэновского сдвига частоты (БСЧ) f_B относительно начального уровня f_{B0} и оценки натяжения оптического волокна (ОВ), вызванных только продольными растягивающими нагрузками, необходимо определить изменения БСЧ, вызванные температурными изменениями, и сделать коррекцию результатов. После анализа бриллюэновских мульти-рефлектограмм и исключения явных отражательных событий определяются участки ОВ с линейным возрастанием (повышение температуры ОВ) или уменьшением (охлаждение ОВ) мощности обратно отражённого сигнала рассеяния Мандельштама – Бриллюэна (РМБ) вдоль ОВ. Зависимость мощности обратно отражённого сигнала РМБ от температуры T имеет вид:

$$P(T)[\text{дБ}] = P(T_0)[\text{дБ}] + 1.0145[\text{дБ/К}] \Delta T. \quad (1)$$

Из (1) можно выделить изменение температуры, а затем определить вызванное этим смещение БСЧ (f_{BT}) относительно f_{B0} [1, 2]:

$$\Delta T = T - T_0 = \frac{P(T)/P(T_0) - 1}{1.0033} = \frac{P(T)[\text{дБ}] - P(T_0)[\text{дБ}]}{1.0145[\text{дБ/}^\circ\text{C}]}, \quad f_{BT}(T) = C_f^T (T - T_0). \quad (2)$$

Это позволяет определить изменение БСЧ и натяжения ОВ, которые были вызваны исключительно продольными растягивающими силами:

$$f_B(\varepsilon_E) = f_{B0} + C_f^\varepsilon (\varepsilon_E - \varepsilon_{E0}) + f_{BT} \cdot \varepsilon_E = \varepsilon_{E0} + (f_B - f_{B0} - f_{BT}) / C_f^\varepsilon \cdot (3)$$

С целью автоматизации процесса обработки бриллюэновских рефлектограмм в ОмГТУ были разработаны программы [1 - 3].

Для выявления фактора воздействия и компенсации влияния температуры на БСЧ и натяжение ОВ следует загрузить файл мульти-рефлектограммы [1 - 3]. Необходимые для дальнейшего анализа данные автоматически выделяются программой (рис. 1), затем формируются СРМБ ОВ, графики натяжения и уровня обратно отражённого сигнала.

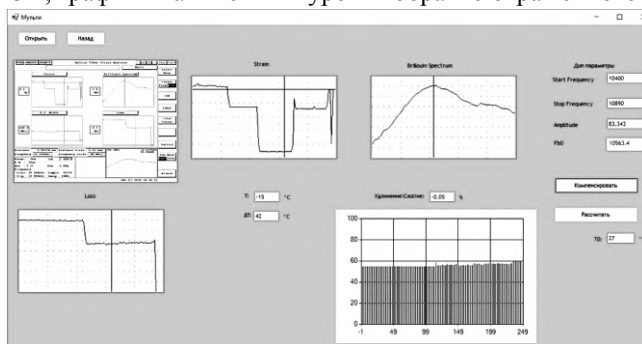


Рис. 1. Копия экрана при компенсации изменений БСЧ и натяжения, вызванных изменением температуры

По графику уровня обратно отражённого сигнала («Loss») определяется изменение БСЧ, которое вызвано только изменением температуры, и (после нажатия кнопки «Компенсировать») производится соответствующая компенсация в зависимостях продольного натяжения.

Таким образом, если регистрировать изменение и БСЧ, и мощности обратно отражённого сигнала РМБ, то можно определить фактор воздействия на ОВ и сделать коррекцию.

Список литературы

1. Богачков И.В., Комисарчук Н.А. Программа для анализа бриллюэновских рефлектограмм оптических волокон // Сб. тр. IX Междунар. конф. по фотонике и информационной оптике. М.: НИЯУ МИФИ, 2020. С. 585-586.
2. Богачков И.В., Тюленев А.С. Программа для автоматизированной обработки бриллюэновских рефлектограмм оптических волокон // Сб. тр. X Междунар. конф. по фотонике и информационной оптике. М.: НИЯУ МИФИ, 2021. С. 357-358.
3. Богачков И.В. Программа для выявления типа воздействия на оптические волокна и определения их натяжения. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019667360. Заявл. 13.12.2019, опубл. 23.12.2019.

А.А. ПАНЬКОВ

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИНДИКАТОРНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ СО ВСТРОЕННЫМ ОПТОВОЛОКОННЫМ PEL-ДАТЧИКОМ

Исследуется индикаторное полимерное покрытие со встроенным оптоволоконным пьезоэлектролюминесцентным (PEL) датчиком. Осуществлено вычисление собственных частот и форм колебаний представительного фрагмента индикаторного покрытия при действии управляющего электрического напряжения на электродах датчика в зависимости от температуры покрытия или от толщины присоединённого к нему слоя льда.

A.A. PAN'KOV

Perm National Research Polytechnic University

MODAL ANALYSIS OF INDICATOR POLYMER COATINGS WITH BUILT-IN FIBER OPTIC PEL-SENSOR

An indicator polymer coating with an integrated optical fiber piezoelectroluminescent (PEL) sensor is investigated. The eigenfrequencies and waveforms of the representative fragment of the indicator coating are calculated when the control electric voltage is applied to the electrodes of the sensor depending on the coating temperature or the thickness of the ice layer attached to it.

Целью работы является модальный анализ индикаторного полимерного покрытия со встроенным оптоволоконным PEL-датчиком (рис. 1) [1] для резонансных режимов измерения температуры [2] или очистки от загрязнений (обледенения) своей внешней поверхности [3].

Рассчитаны собственные частоты и формы колебаний представительного фрагмента индикаторного полимерного покрытия в зависимости от температуры покрытия T или от толщины h присоединённого к нему слоя льда при действии управляющего электрического переменного напряжения $U_{\text{упр}}$ с частотой f на электродах датчика. Самоочистка покрытия происходит при достижении толщины h своего заданного предельного значения h_* , при котором наступает резонанс и, как следствие, разрушение слоя льда. Например, предельному значению $h_* = 2$ мм соответствует заданная частота управляющего электрического напряжения $U_{\text{упр}} \approx 5152$ Гц (рис. 2, график 3). Найдены

частотные зависимости амплитуд напряжений σ в слое льда и на границе «покрытие/лёд» (рис. 3) для различных значений толщины слоя льда h .

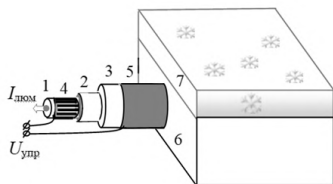


Рис. 1. Фрагмент индикаторного полимерного покрытия со встроенным датчиком :

- 1 – оптоволоконно,
- 2 – электролюминесцентная,
- 3 – пьезоэлектрическая оболочки,
- 4, 5 – управляющие электроды,
- 6 – полимер (корпус), 7 – лёд

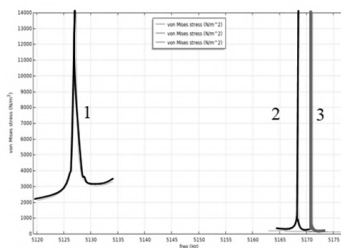


Рис. 2. Зависимости амплитуды напряжения по Мизесу σ_{Mises} в слое льда от частоты f управляющего электрического напряжения $U_{\text{упр}}$ при толщине льда $h = 0.5$ мм (график 1), 1 мм (график 2) и 2 мм (график 3)

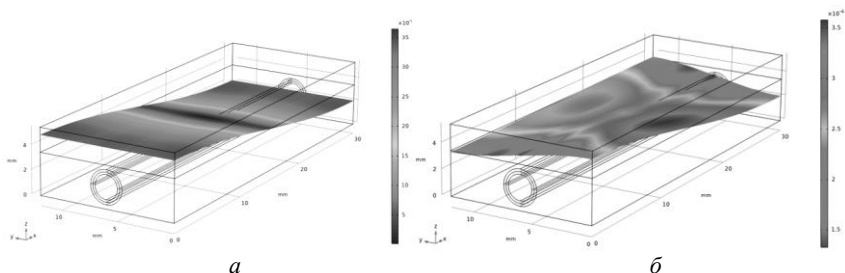


Рис. 3. Поля напряжений σ_{zz} на границе «покрытие/лёд» для первой (а) и второй (б) форм колебаний покрытия при толщине слоя льда $h = 2$ мм

Результаты получены при выполнении государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение фундаментальных научных исследований (проект № FSNM-2020-0026).

Список литературы

1. Паньков А.А. Патент RU № 2748665. Оpubл.: 28.05.2021. Бюл. № 16.
2. Pan'kov A.A. // Sensors and Actuators A. 2019. V. 288. P. 171-176.
3. Cao Y., Tan W., et. al. // Aerospace Science and Technology. 2018. V. 75. P. 353-385.

Т.И. МУРАШКИНА, Н.А. ХАСАНШИНА, В.А. БАДЕЕВ¹,
Е.А. БАДЕЕВА, Е.А. ШАЧНЕВА², Р.В. КОСТИН, А.Г. ДВОРЕЦКИЙ²

Пензенский государственный университет

¹*Школа № 203, Заречный, Пензенская обл.*

²*МИРЭА – Российский технологический университет, Москва*

РАДИАЦИОННО СТОЙКАЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЖИДКОСТНЫХ ПОТОКОВ

Рассмотрено возможное исполнение волоконно-оптической системы измерения параметров жидкостных потоков для транспортного энергетического модуля с ядерной энергодвигательной установкой мегаваттного класса на основе волоконно-оптического датчика разности давлений (ВОДРД) и радиационного и температурного каналов коррекции возможных дополнительных погрешностей.

T.I. MURASHKINA, N.A. KHASANSHINA, V.A. BADEEV¹,
E.A. BADEEVA, E.A. SHACHNEVA², R.V. KOSTIN,
A.G. DVORETSKIY²

Penza State University

¹*School No. 203, Zarechny, Penza region*

²*MIREA – Russian Technological University, Moscow*

RADIATION-RESISTANT FIBER-OPTIC MEASUREMENT SYSTEM PARAMETERS OF LIQUID FLOWS

A possible design of a fiber-optic system for measuring the parameters of liquid flows for a transport power module with a megawatt-class nuclear power propulsion system based on a fiber-optic pressure difference sensor and radiation and temperature channels for correcting possible additional errors is considered.

Для измерения расхода топлива в измерительных системах можно использовать датчики расхода, основанные на измерении разности давлений. Если измеряются параметры искро-взрыво-пожароопасной жидкости, то целесообразно применение ВОДРД [1 - 3]. Топливо под давлениями P1 и P2 подаётся в плюсовую и минусовую камеры волоконно-оптического преобразователя разности давлений (ВОПРД) (рис. 1). Измеряемые разность давления, уровень наведённой радиации и температура преобразуются в изменение параметров оптического излучения, сформированного источником излучения ИИ, расположенным

в согласующем устройстве СУ, и передаваемого в электронный блок преобразования информации БПИ по четырём радиационно-стойким оптическим волокнам ОВ, объединённым в гофрированную трубку, образующим волоконно-оптический кабель ВОК.

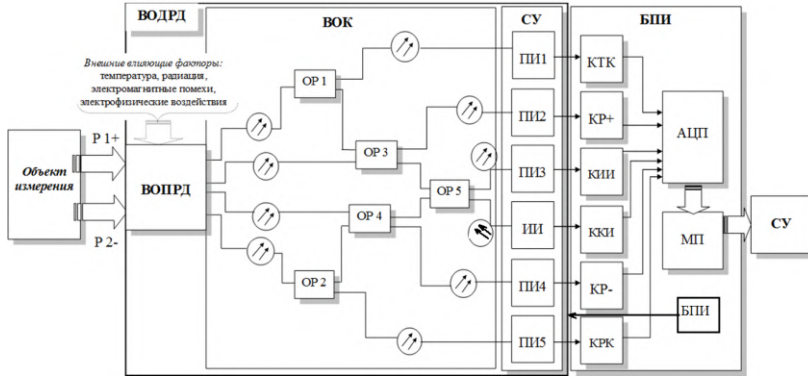


Рис. 1. Функциональная схема на основе ВОПРД: КР+ и КР – первый и второй измерительные каналы давления; КРК – канал радиационной коррекции; КТК – канал температурной коррекции; КИИ – канал источника излучения; ККИ – канал коррекции источника излучения; СУ – канал системы управления и защиты; МП – микропроцессорное устройство

В КРК формируется компенсационный сигнал. В ОВ от воздействия радиации происходит затемнение материала сердцевины, что снижает интенсивность оптического сигнала. Измерение этого параметра позволит скомпенсировать потери в каналах КР+ и КР–. В КИИ формируется оптический сигнал, направляемый на мембраны ВОПРД. Каналы КР+ и КР– передают оптические сигналы на АЦП, где оцифровываются, обрабатываются по заданным алгоритмам в МП и передаются на регистрирующую аппаратуру системы управления СУ. Дифференциальная схема оптической системы позволяет снизить большинство дополнительных погрешностей системы, в первую очередь, радиации.

Список литературы

1. Дифференциальный волоконно-оптический датчик разности давления. Патент на изобретение РФ № 2567176.
2. Бадеева Е.А., Мурашкина Т.И., Серебряков Д.И. и др. Радиационно-стойкий ВОПРД для первого контура атомных реакторов // Надёжность и качество: Статьи Межд. симп.: в 2 т. Пенза : Изд-во Пенз. ГУ, 2014. Т. 2. С. 71-74.
3. Murashkina T.I., Badeeva E.A., Shachneva E.A., et. al. Fiber-optic differential pressure sensor with a cylindrical lens // Journal of Engineering and Applied Sciences.

Т.И. МУРАШКИНА, А.Н. КУКУШКИН, В.А. БАДЕЕВ¹,
Е.А. ДУДОРОВ, А.А. ТОЛОВА

Пензенский государственный университет

¹Школа № 203, Заречный, Пензенская обл.

ОЦЕНКА ИСКРОВЗРЫВОПОЖАРОБЕЗОПАСНОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Проведена оценка технического состояния волоконно-оптической информационно-измерительной системы (ВОИИС) на основе волоконно-оптических датчиков (ВОД) с открытым оптическим каналом в части искровзрывопожаробезопасности. Доказано, что по оптическим волокнам в зону измерений передаются оптические сигналы относительно низких уровней мощности. Выявлено, что для изделий ракетно-космической техники уровень оптического сигнала не должен превышать 40 мВт.

T.I. MURASHKINA, A.N. KUKUSHKIN, V.A. BADEEV¹,
E.A. DUDOROV, A.A. TOLOVA

Penza State University

¹School No. 203, Zarechny, Penza region

EVALUATION OF SPARK-EXPLOSION-FIRE SAFETY OF A FIBER-OPTIC INFORMATION-MEASURING SYSTEM

An assessment of the technical condition of a fiber-optic information and measurement system based on fiber-optic sensors with an open optical channel in terms of spark-explosion-fire safety was carried out. It is proved that optical signals of relatively low power levels are transmitted through optical fibers to the measurement zone. It was revealed that for rocket and space technology products, the optical signal level should not exceed 40 mW.

Для оценки искровзрывопожаробезопасности ВОИИС, включающей ВОД₁...ВОД_N, где 1, 2,...N – порядковые номера ВОД, рассмотренной в [1], выполнен её энергетический расчёт (табл. 1). Сигнал от источника излучения ИИ до приёмника излучения ПИ1 первого измерительного канала (ИК) проходит через узел юстировки УЮ1, подводящее оптическое волокно ПОВ, второй узел юстировки УЮ2, зону измерения (ВОП), третий узел юстировки УЮ3, ООВ1 первого ИК, четвёртый узел

юстировки УЮ4. Во втором ИК-сигнал из зоны измерения проходит через узел юстировки УЮ5, ООВ2, узел юстировки УЮ6.

Таблица 1. Потери, вносимые элементами ВОИИС

Элемент (источник потерь)	Потери (затухание на 1 элемент)	Количество элементов в тракте Q, шт.	Суммарные потери (затухание), дБ
ВОК, включающий по одному ПОВ, ООВ1 и ООВ2 (2...200 м)	0,05...0,4 дБ/км	3 (2...200) м или 3 (0,02...0,2) км	$(\eta_2 + \eta_7 + \eta_9) =$ $= 3(0,02...0,4) \times$ $\times (0,05...0,2)$
Узел юстировки УЮ1	10...11 дБ	1	$\eta_1 = 10...11$
Узлы юстировки УЮ4, УЮ6	1...2 дБ	2	$\eta_7 + \eta_{10} =$ $= (1...2)2$
Узлы юстировки УЮ2, УЮ3, УЮ5	5...7 дБ	3	$\eta_3 + \eta_5 + \eta_8 =$ $= (5...7)3$
Волоконно-оптический преобразователь ВОП (в том числе ОВ внутри ВОП)	7...9 (1 дБ/км)	1 (0,0002 км)	$\eta_4 = (7...9) +$ $+ 0,0002$

Учитывая, что при вводе излучения в ПОВ от ИИ потери η_1 достигают 10...11 дБ, необходимо обеспечить уровни минимально вводимой в волокно оптической мощности 0,05...0,1 мВт. При использовании ПИ с чувствительностью около 45 дБ вводимая в ОВ для надёжной работы ВОИИС оптическая мощность $P_{\text{ПИ}}$ должна составлять минус 5 дБ.

С учётом потерь в линии минимальная оптическая мощность ИИ должна составить: $P_{\text{ИИ}} = 0,63$ мВт. Целесообразно сочетание следующих инфракрасных свето- и фотодиодов: 3Л107Б – ФД256, 3Л107Б – КФДМ, 3Л107Б – ФД-20-32К, 3Л119 – ФД19КК и т.п.

Доказано, что искровзрывопожаробезопасность ВОИИС обеспечена (в зоне расположения электронных компонентов: $10 \text{ мВт} < 40 \text{ мВт}$; в зоне измерения $0,05...0,1 \text{ мВт} \ll 40 \text{ мВт}$) [2].

Список литературы

1. Бадеева Е.А., Мурашкина Т.И., Полякова Е.А., Славкин И.Е., Кукушкин А.Н. Реализация принципа двухканальности в волоконно-оптических информационно-измерительных системах // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 2 (58). С. 87-98.
2. Задворнов С.А., Соколовский А.А. О пожаробезопасности волоконно-оптических гибридных измерительных систем // Датчики и системы. 2007. № 3. С. 11-14.

Я.В. ПРЖИЯЛКОВСКИЙ^{2,1}, Н.И. СТАРОСТИН^{1,2},
С.К. МОРШНЕВ^{1,2}, А.И. САЗОНОВ^{1,2}

¹*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН*

²*ООО «НПЦ Профотек», Москва*

ВОЛОКОННЫЙ ДАТЧИК ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА С ПОДАВЛЕНИЕМ ИЗБЫТОЧНОГО ШУМА

В работе исследуется волоконно-оптический датчик электрического тока на основе эффекта Фарадея с подавлением избыточного шума, предназначенный для регистрации импульсных токов. Построена подробная модель, объясняющая зависимость характеристик датчика от радиуса намотки чувствительного spun-волокна. Для повышения эффективности подавления шума при малом радиусе намотки вплоть до 5 мм предложена новая конфигурация намотки с плавным изменением радиуса. Экспериментально продемонстрировано снижение шума на 14 дБ.

Ya.V. PRZHIYALKOVSKIY^{2,1}, N.I. STAROSTIN^{1,2},
S.K. MORSHNEV^{1,2}, A.I. SAZONOV^{1,2}

¹*Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS*

²*SPC Profotech, Moscow*

FIBER CURRENT SENSOR WITH EXCESS NOISE SUBTRACTION

A fiber-optic Faraday current sensor with excess noise suppression, designed for pulsed current measuring, is investigated. A detailed model is elaborated that reveals the relation of sensor characteristics with the winding radius of the sensitive spun fiber. To increase the efficiency of noise suppression when the fiber is coiled with a small radius down to 5 mm, a new winding configuration with smooth changing of radius is proposed. A noise reduction of 14 dB has been experimentally demonstrated.

Последние достижения в разработке волоконно-оптических датчиков электрического тока (ВОДТ), основанных на магнитооптическом эффекте Фарадея, делают их высокоэффективными для метрологических целей и привели к значительному расширению сферы их применения [1]. В частности, учитывая низкую инерционность эффекта Фарадея ($\sim 10^{-9}$ с), такие датчики представляют интерес в приложениях, связанных с измерениями импульсных токов, например, в линейных импульсных ускорителях электронов. При этом, для увеличения временного

разрешения датчика необходимо сократить линейную длину чувствительного волокна, что, при неизменной чувствительности датчика, требует уменьшения радиуса намотки волокна. Одновременно с этим, повышенные требования предъявляются к шумовым характеристикам датчика. В данной работе исследуется ВОДТ на основе низкокогерентного отражательного интерферометра [2] с чувствительным *spun*-волокном, намотанным по малому радиусу, и подсистемой подавления избыточного шума [3].

Одним из важнейших факторов, определяющих основные характеристики ВОДТ, является динамика поляризации света в чувствительном *spun*-волокне. Эксперимент показывает, что при малом радиусе намотки *spun*-волокна (до 5 мм), когда изгибное двулучепреломление в волокне становится существенным, происходит резкое снижение как видности интерферометра ВОДТ, так и эффективности подавления избыточного шума. Детальные теоретические исследования показали, что данный эффект обусловлен деформацией спектра детектируемого излучения, возникающей из-за возникновения существенных по амплитуде вторичных волн при отражении света от зеркала.

Для повышения характеристик датчика при намотке *spun*-волокна по малому радиусу в работе предложено применять модифицированную намотку с плавным снижением радиуса в начале и конце волокна. В результате такой намотки поляризационные моды излучения на входе/выходе *spun*-волокна становятся близкими к циркулярным – также, как и у прямого *spun*-волокна. В этом случае мощность вторичных волн при отражении от зеркала будет минимальна, и деформация спектра излучения в сигнальном канале датчика будет незначительна. В результате видность интерферометра и коэффициент подавления избыточного шума будут близкими к случаю намотки с большим радиусом. Экспериментально полученное подавление шума, используя описанный подход, составило до 14 дБ.

Список литературы

1. Пржиялковский Я.В. и др. Регистрация импульсов электрического тока волоконно-оптическим датчиком с использованием *spun*-световодов // Квантовая электроника. 2018. Т. 48. № 1. С. 62-69.
2. Bohnert K., et al. Optical fiber sensors for the electric power industry // Optics and Lasers in Engineering. 2005. V. 43. № 3-5. P. 511-526.
3. Przhilyalkovskiy Y.V., et al. Fiber-optic sensor for detecting electric current pulses // Proc. SPIE. 2019. V. 11028. P. 110280A.

А.Н. КУКУШКИН

Пензенский государственный университет

РАЗРАБОТКА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА УГЛА НАКЛОНА

Рассматриваются новые технологии определения угла наклона средствами оптико-механических систем и их реализации в датчиках.

A.N. KUKUSHKIN

Penza State University

DEVELOPMENT OF A FIBER OPTIC TILT SENSOR

New technologies for determining the angle of inclination by means of optical-mechanical systems and their implementation in sensors are considered.

Предлагается новый способ измерения угла наклона и волоконно-оптический датчик для его реализации. Учитывается пространственное распределение мощности светового потока на излучающем торце оптических волокон в виде полого усечённого конуса, позволяющее реализовать дифференциальное преобразование оптических сигналов и в 2 - 3 раза снизить дополнительные погрешности от изгибов волокон, воздействия повышенных и пониженных температур и т.п. [1].

Первая модель (рис. 1) основывалась на принципе действия модуляции оптического сигнала при изменении углового положения линзы относительно рабочих торцов оптических волокон. Исходя из уже известных конструкций, был выбран в качестве воспринимающего элемента маятник, в центре подвеса которого закреплён оптический модулятор в виде цилиндрической или шарообразной линзы. При изменении положения опоры, на которой неподвижно закреплён датчик, происходит отклонение маятника с линзой. Изменение положения линзы изменяет направление светового потока, благодаря которому становится возможным зафиксировать новое значение угла отклонения. Именно этот способ модуляции позволяет фиксировать угловые отклонения до 30 ° [2]. Ход светового потока от подводящего оптического волокна через линзу к отводящему оптическому волокну изображён на рис. 2.

Из-за сложности юстировки линзы на этапе сборки, было принято решение опробовать другие способы преобразования светового потока при изменении угла наклона объекта, в частности с применением

предельного аттенуатора [3]. Переработана конструкция маятника так, чтобы при изменении угла наклона изменялась площадь отверстия, через которое проходит свет. За счёт этого можно изменять мощность излучения, поступающего на приёмник излучения по отводящему из зоны измерения оптическому волокну. Как и в первом варианте отклоняется опора маятника. Схематичное изображение взаимного положения лучей света и элементов измерительного преобразователя датчика при отклонении маятника представлено на рис. 3.

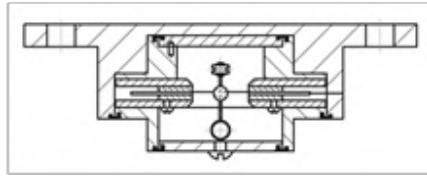


Рис. 1. Конструкция первой модели волоконно-оптического датчика угла наклона

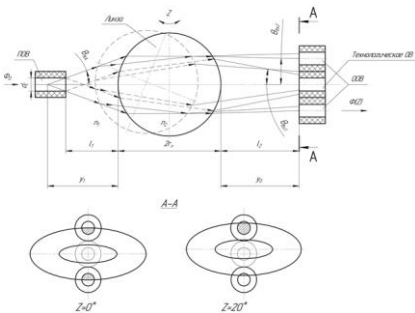


Рис. 2. Ход светового потока в датчике

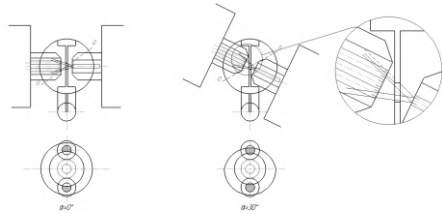


Рис. 3. Ход светового потока в новой конструкции

Список литературы

1. Бадеева Е.А. Научная концепция проектирования волоконно-оптических датчиков давления с открытым оптическим каналом для ракетно-космической и авиационной техники // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2016. № 4 (40).
2. Кукушкин А.Н., Жуманазаров М.Ж. Разработка волоконно-оптического датчика больших угловых перемещений для стартовой площадки космодрома // Волоконно-оптические, лазерные и нанотехнологии в наукоёмком приборостроении: материалы МНТК с элементами научной молодёжной школы, посвящ. 20-летию ведущей научной школы России «Волоконно-оптическое приборостроение». Пенза: Изд-во ПГУ, 2018. С. 10-13.
3. Кукушкин А.Н., Разработка волоконно-оптического датчика больших угловых перемещений для стартовой площадки космодрома // Материалы XII Межд. научно-технической конф. с элементами научной школы и конкурсом научно-исследовательских работ для студентов, аспирантов и молодых ученых. Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. С. 168-174.

А.Т. ТУРОВ^{1,2}, Ю.А. КОНСТАНТИНОВ², М.Е. БЕЛОКРЫЛОВ²,
А.Ю. МАКСИМОВ²

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет

²Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН

ПРОСТОЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ РАСПРЕДЕЛЁННЫЙ ДАТЧИК ВИБРАЦИЙ

Данная работа представляет датчик вибраций почвы и его систему обработки данных, предназначенные для исследователей в области агрономии и вибрационной экологии. Датчик обладает одной из самых простых конструкций из возможных и является относительно дешёвым. В работе освещаются некоторые трудности, с которыми авторам пришлось столкнуться в процессе создания датчика и сообщается об успешном прохождении испытаний работоспособности и пригодности для нужд тех сфер науки и промышленности, которые заинтересованы в его появлении.

А.Т. TUROV^{1,2}, Yu.A. KONSTANTINOV², M.E. BELOKRYLOV²,
A.Yu. MAKSIMOV²

¹Perm National Research Polytechnic University

²Perm Federal Research Center of Ural Branch of the RAS

SIMPLE FIBER OPTICAL DISTRIBUTED ACOUSTIC SENSOR

This work presents the soil vibrations sensor and its data processing system, designed for the researchers in agriculture and vibration ecology. The sensor has one of the most simple constructions and is relatively cheap. The work reveals some of the difficulties that authors had to deal with while creating the sensor and reports the sensor to have been successfully passed the trials and admitted suitable for the needs of the spheres of science and industry that are interested in its creation.

Акустические колебания могут оказывать на растения как отрицательное влияние [1], так и положительное [2], например, увеличивая урожайность на 30 - 40 %. Сообщается о положительном влиянии вибраций на развитие пшеницы [3]. Отмечается, что сейчас исследования в данной области, такие, как, например, определение диапазонов частот и амплитуд, оказывающих положительное и отрицательное влияния, ограничивается отсутствием эффективной системы мониторинга.

Целью работы являлось создание распределённого оптоволоконного датчика акустических вибраций для нужд исследователей в области

агрономии и вибрационной экологии. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки.

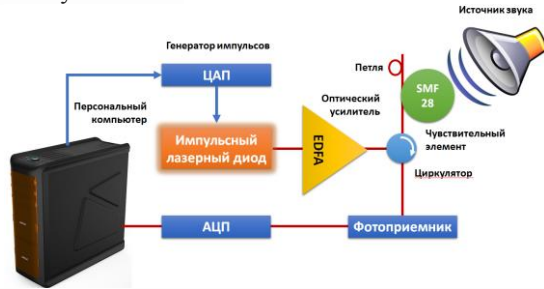


Рис. 1. Схематическое устройство предлагаемого датчика

С целью оценки пригодности датчика был проведён ряд экспериментов (рис. 2). Его чувствительный элемент, состоял из двух сваренных катушек оптоволокна “SMF-28” длинами 800 и 1200 м. Первая подвергалась вибрационному воздействию, в то время как вторая была от него изолирована, находясь в соседнем помещении. В первом случае на чувствительный элемент воздействовали вибрациями с частотой 30 Гц, от 100 до 1000 Гц с шагом в 100 Гц, и от 1500 до 8000 Гц с шагом 500 Гц. Во втором случае воздействие осуществлялось частотой в 1200 Гц, но начиналось и прекращалось во время записи сигнала.

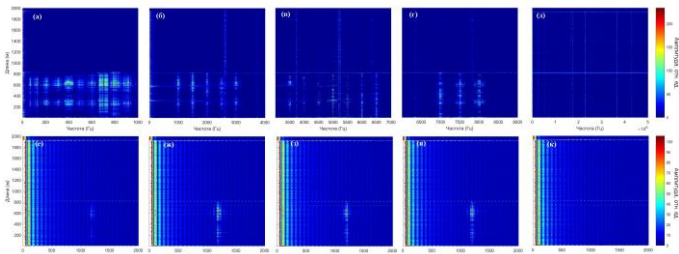


Рис. 2. Регистрация датчиком частот из исследованного диапазона (а) – (з); «тишина» (д); локализация во времени воздействия с частотой 1200 Гц (е) – (к); время от начала записи 0 - 0,15; 0,15 - 0,30; 0,30 - 0,45; 0,45 - 0,60; 0,60 - 0,75 с

Работа выполнена в рамках государственного задания с номером государственной регистрации темы АААА-А19-119051390040-5.

Список литературы

1. Horoshenkov K. et al. // Proceedings of the Institute of Acoustics. 2012. V. 34. P. 68-75.
2. Шапин В.И., Огурцов Ф.Б. Патент РФ № 2603589. 2016.
3. Беркович Ю.А. и др. // Доклады Академии наук. 2010.

Т.И. МУРАШКИНА, А.А. ТОЛОВА, А.Н. КУКУШКИН,
Е.А. ДУДОРОВ

Пензенский государственный университет

3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ДЕФОРМАЦИИ АТТЕНУАТОРНОГО ТИПА

Рассмотрена 3D-модель волоконно-оптического датчика деформации аттенуаторного типа, основными элементами которого являются волоконно-оптический преобразователь линейных микроперемещений с отводящими и подводящими оптическими волокнами и аттенуатором и воспринимающий элемент, состоящий из двух стержней, смещающихся друг относительно друга при силовом воздействии.

T.I. MURASHKINA, A.A. TOLOVA, A.N. KUKUSHKIN,
E.A. DUDOROV

Penza State University

3D-MODELING OF A FIBER-OPTIC STRAIN SENSOR OF ATTENUATOR TYPE

A 3D-model of an attenuator-type fiber-optic strain sensor is considered, the main elements of which are a fiber-optic converter of linear micro-displacements with outgoing and incoming optical fibers and an attenuator and a sensing element consisting of two rods that shift relative to each other under force action.

Для мониторинга деформаций крупногабаритных сооружений, в частности, опорных и несущих конструкций мостов, объектов нефтегазового комплекса используются в основном струнные датчики деформации, что недостаточно безопасно. Для снижения риска возникновения взрыва или пожара предлагается использовать волоконно-оптический датчик деформации (ВОДФ).

Основным элементом ВОДФ аттенуаторного типа является волоконно-оптический преобразователь (ВОП) линейных микроперемещений аттенуаторного типа [1]. Излучающий торец подводящего оптического волокна (ПОВ), аттенуатор (шторка) с круглым отверстием, перемещающийся под действием измеряемой физической величины, и приёмные торцы отводящих оптических волокон (ООВ) первого и второго измерительных каналов расположены соосно друг другу (рис. 1).

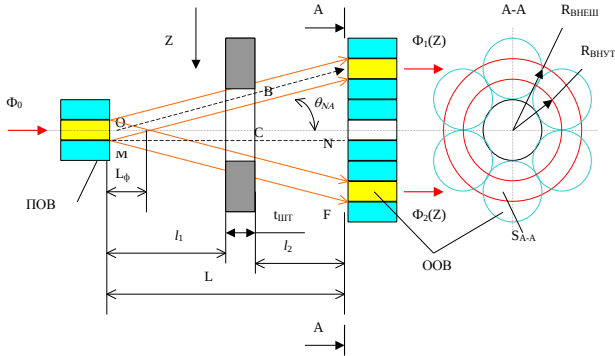


Рис. 1. Волоконно-оптический преобразователь линейных микроперемещений аттенуаторного типа

Приёмный торец ПОВ подстыкован к источнику излучения, а излучающие торцы ООВ1 и ООВ2 подстыкованы к ПИ1 и ПИ2 первого и второго измерительных каналов соответственно.

На разработанной 3D-модели показано, что в конструкцию введён воспринимающий деформацию элемент, состоящий из двух стержней, на одном из которых закреплён аттенуатор, а на другом закреплены оптические волокна, при этом внутренняя полость датчика герметичная (рис. 2 и 3).



Рис. 2. 3D-модель ВОДФ аттенуаторного типа

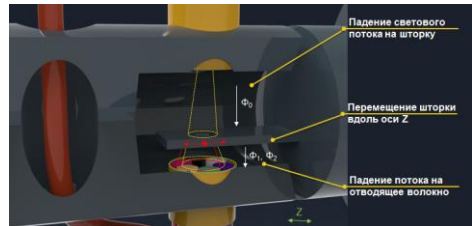


Рис. 3. 3D-модель оптической системы

Список литературы

1. Мурашкина Т.И., Бадеева Е.А. Волоконно-оптические приборы и системы: научные разработки НТЦ «Нанотехнологии волоконно-оптических систем» Пензенского государственного университета. СПб: Политехника, 2018.

2. Бадеева Е.А., Мещеряков В.А., Мурашкина Т.И., Пивкин А.Г. Волоконно-оптические датчики давления аттенуаторного типа для летательных аппаратов // Датчики и системы. 2003. № 4. С. 11-14.

Т.И. МУРАШКИНА, А.Н. КУКУШКИН, В.А. БАДЕЕВ¹,
А.А. ТОЛОВА, Т.В. ПАРШИКОВА

Пензенский государственный университет

¹Школа № 203, Заречный, Пензенская обл.

СПОСОБ УСТАНОВКИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ДЕФОРМАЦИИ В УГЛОВОМ СТЫКЕ СООРУЖЕНИЯ

Рассмотрен способ установки волоконно-оптического датчика (ВОД) деформации отражательного типа на потолочном перекрытии при мониторинге напряжённо-деформированного состояния строительных объектов. При установке ВОД учитываются особенности крепления отражательного элемента относительно оптических волокон в соответствии с расчётом критического прогиба деформируемого объекта.

T.I. MURASHKINA, A.N. KUKUSHKIN, V.A. BADEEV¹,
A.A. TOLOVA, T.V. PARSHIKOVA

Penza State University

¹School No. 203, Zarechny, Penza region

METHOD OF INSTALLATION OF FIBER-OPTIC STRAIN SENSOR IN THE CORNER JOINT OF THE STRUCTURE

The method of installing a fiber-optic sensor (FOS) of the reflective type deformation on the ceiling when monitoring the stress-strain state of construction objects is considered. When installing the FOS, the features of fixing the reflective element relative to the optical fibers are taken into account in accordance with the calculation of the critical deflection of the deformable object.

Для мониторинга напряжённо-деформированного состояния крупных сооружений возможно использование ВОД деформации на основе преобразователя угла отражательного типа [1, 2]. Из условия механической надёжности рассчитывают критический прогиб $W_{кр}$ в центре строительного объекта (рис. 1). Известно, что максимальный прогиб $W_{кр}$ даже при неравномерном распределении нагрузки на деформируемый объект (например, потолочное перекрытие) находится ближе к центру [3]. В пределах упругих деформаций объектов прогиб объекта весьма мал, соответственно можно считать, что из-за малости угла поворота деформированной линии относительно недеформированной

1. *Journal of the American Medical Association*, 1997; 278: 1039-1044.

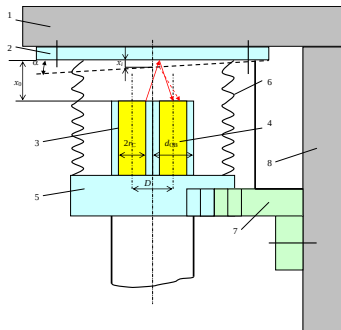


Рис. 2. Схема установки
ВОДУП на объекте

1. *Journal of the American Medical Association*, 1997; 278: 1039-1044.

1. Бадеева Е.А., Мурашкина Т.И., Кукушкин А.Н., Серебряков Д.И., Хасаншина Н.А. Способ измерения деформации и волоконно-оптический датчик угловых перемещений для его реализации. Заявка на изобретение № 2019111093 от 12.04.2019.

3. Ицкович Г.М. Сопротивление материалов. М.: Высшая школа, 1976.

А.А. ПАНЬКОВ, П.В. ПИСАРЕВ

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ «ПЛАСТИНА/ДАТЧИК»

Осуществлён расчёт и частотный анализ в пакете ANSYS комплексных величин управляющих и информативных передаточных коэффициентов оптоволоконного пьезоэлектролюминесцентного (PEL) датчика на поверхности композитной пластины для первых шести различных форм колебаний.

A.A. PAN'KOV, P.V. PISAREV

Perm National Research Polytechnic University

COMPUTER SIMULATION OF DYNAMIC DEFORMATION OF PLATE/SENSOR SYSTEM

The complex values of the control and informative transfer coefficients of the optical fiber piezoelectroluminescent (PEL) sensor on the surface of the composite plate for the first six different forms of oscillations were calculated and frequency analyzed in the ANSYS package.

Актуальность решения проблемы непрерывного мониторинга эксплуатационных физико-механических характеристик ответственных высоконагруженных конструкций из полимерных композиционных материалов обусловила появление и интенсивное развитие встроенных оптоволоконных систем неразрушающего контроля с использованием различных функциональных «интеллектуальных» материалов [1].

Целью работы является построение компьютерной модели оптоволоконного PEL-датчика [2, 3], закреплённого на поверхности протяжённой композитной пластины (рис. 1), и вычисление динамических характеристик датчика как элемента системы «пластина/датчик» для диагностирования сложного вибрационного напряжённого состояния пластины и/или демпфирования её вибраций. В оптоволоконном PEL-датчике информативные световые сигналы возникают в силу механолюминесцентного эффекта, обусловленного взаимодействием пьезоэлектрической и электролюминесцентной оболочек датчика; световые сигналы проникают внутрь оптоволокну через его боковую поверхность, передаются по нему и регистрируются приёмником-анализатором на выходе из оптоволокну.

Осуществлено решение стационарной связанной краевой задачи электроупругости для расчётной области «пластина/датчик» (рис. 2) в пакете ANSYS с учётом электрических проводимостей фаз и максвелл-вагнеровской релаксации электрических полей внутри датчика. Установлены и изучены закономерности частотных зависимостей для действительных и мнимых частей комплексных управляющих и информативных передаточных коэффициентов датчика для первых шести различных форм колебаний. Дана оценка величины коэффициента рассеивания энергии датчиком при демпфировании вибраций пластины.

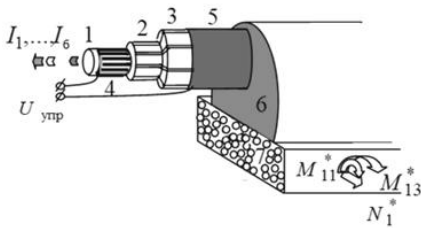


Рис. 1. Поверхностный оптоволоконный PEL-датчик: 1 – оптоволоконно, 2, 3 – электролюминесцентная и пьезоэлектрическая оболочки, 4, 5 – управляющие электроды, 6 – корпус, 7 – полимерный композит

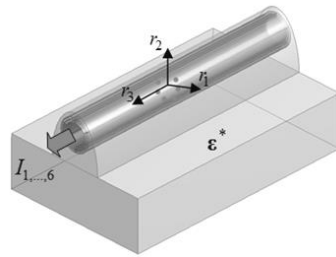


Рис. 2. Расчётная область системы «пластина/датчик» с шестью контрольными точками измерения электрических потенциалов

Результаты получены при выполнении государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение фундаментальных научных исследований (проект № FSNM-2020-0026).

Список литературы

1. Каблов Е.Н., Морозов Г.А., и др. // Авиационные материалы 75 лет. Избранные труды, 2007. С. 331-342.
2. Паньков А.А. Патент RU № 2643692. Оpubл.: 05.02.2018. Бюл. № 4.
3. Pan'kov A.A. // Mechanics of Composite Materials. 2018. V. 54(2). P. 155-164.

Т.И. МУРАШКИНА, Е.А. БАДЕЕВА, Т.В. ПАРШИКОВА

Пензенский государственный университет

**ФУНКЦИЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ
В ПАРЕНХИМАТОЗНЫХ ОРГАНАХ**

Выведена функция преобразования (ФП) волоконно-оптического датчика (ВОДНД), предназначенного для измерения низкого давления в диапазоне 0...20 кПа в паренхиматозных органах: печени и почках. Рассчитан прогиб мембраны, имеющей малые габариты и стабильную упругость материала, обеспечивающий требуемую чувствительность преобразования оптического сигнала.

T.I. MURASHKINA, E.A. BADEEVA, T.V. PARSHIKOVA

Penza State University

**FIBER-OPTIC SENSOR CONVERSION FUNCTION
FOR MEASURING LOW PRESSURE
IN PARENCHYMAL ORGANS**

The conversion function (AF) of a fiber-optic sensor (VOD) designed to measure low pressure in the range of 0.20 kPa in parenchymal organs: liver and kidneys is derived. The deflection of a membrane with small dimensions and stable elasticity of the material providing the required sensitivity of optical signal conversion is calculated.

На различных стадиях диагностики состояния организма человека необходимы соответствующие медицинские технические средства измерения давления [1]. Основная проблема – низкие значения измеряемых давлений, в связи с чем трудно достичь нужной чувствительности преобразования сигналов. В разрабатываемом ВОДНД модуляция оптического сигнала происходит при микроперемещениях зеркально отражающей поверхности под воздействием давления (рис. 1) [2, 3]. Лучи света от подводящего оптического волокна ПОВ проходят в прямом и обратном направлениях путь $L(X)/2$ до отражателя и до отводящего оптического волокна (ООВ) под апертурным углом Θ_{NA} к оптической оси волокна. Определена математическая модель (1) и вид ФП ВОДНД (рис. 2) для определённого по известной формуле (2) [3] прогиба мембраны $w = 50$ мкм, в диапазоне $X_i = 950...1000$ мкм (рис. 3):

$$\Phi(X) = \Phi_0 \frac{\rho}{4\pi r_c (2X_i \Theta_{NA} - r_c)} \left\{ \frac{R}{2} \left[\frac{\pi}{90} \arcsin \frac{a}{2R} - \sin \left(2 \arcsin \frac{a}{2R} \right) \right] + \right. \\ \left. + \frac{r_c^2}{2} \left[\frac{\pi}{90} \arcsin \frac{a}{2r_c} - \sin \left(2 \arcsin \frac{a}{2r_c} \right) \right] \right\}. \quad (1)$$

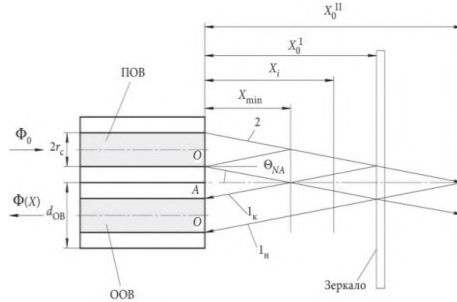


Рис. 1. Модуляция оптического сигнала зеркальной поверхностью

$$w = \frac{3pR^4(1-\mu^2)}{16Eh^2}. \quad (2)$$

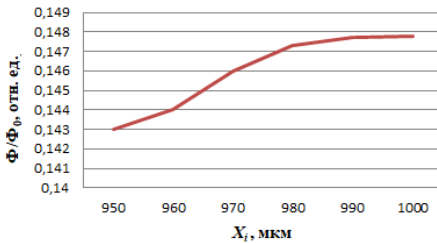


Рис. 2. Вид ФП при коэффициенте отражения мембраны $\rho = 0,95$, радиусе сердцевин $r_c = 200$ мкм; апертурном угле $\Theta_{NA} = 12$ град оптического волокна

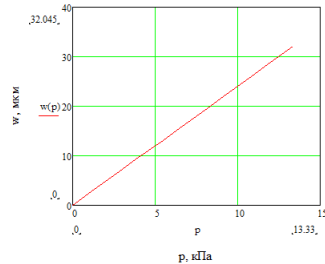


Рис. 3. Зависимость прогиба мембраны от давления $w(p)$ при её радиусе $R = 1$ мм, толщине $h = 0,024$ мм, модуле упругости $E = 4500$ МПа, коэффициенте Пуассона $\mu = 0,45$

Список литературы

1. Бадеева Е.А., Мурашкина Т.И. и др. Проблемные вопросы применения волоконно-оптических датчиков давления в медицинской практике // Новые технологии в медицине, биологии, фармакологии и экологии: Мат. Межд. конф. NT + M&Ec. Москва, 2021. С. 16-32.
2. Бадеева Е.А., Мурашкина Т.И., Мещеряков В.А. Волоконно-оптические датчики давления отражательного типа для летательных аппаратов // Датчики и системы. 2001. № 9. С. 14-18.
3. Мурашкина Т.И., Бадеева Е.А. Волоконно-оптические приборы и системы: научные разработки НТЦ «Нанотехнологии волоконно-оптических систем» Пензенского государственного университета. СПб: Политехника, 2018.

А.В. ПОЛЯКОВ, Е.В. ВОЛЧАНИНА
Белорусский государственный университет, Минск

СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ВОЛОКОННЫХ РЕШЁТОК БРЭГГА ДЛЯ КВАЗИРАСПРЕДЕЛЁННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Представлены результаты исследований спектральных свойств волоконных решёток Брэгга с металлическим покрытием, предназначенных для использования в качестве чувствительных элементов в квазираспределённых волоконно-оптических измерителях температуры.

A.V. POLYAKOV, E.V. VOLCHANINA
Belarusian State University, Minsk

SPECTRAL PROPERTIES OF THE FIBER BRAGG GRATING FOR QUASI-DISTRIBUTED TEMPERATURE MEASURES

The investigations results of the spectral properties of fiber Bragg gratings with a metal coating, intended for use as sensitive elements in quasi-distributed fiber-optic temperature sensors, are presented.

Брэгговские решётки в настоящее время широко используются в оптических волокнах и планарных световодах для уплотнения каналов по длине волны (так называемая DWDM-технология), оптической фильтрации сигналов, как резонаторные зеркала в волоконных и полупроводниковых лазерах, сглаживающие фильтры в оптических усилителях, для компенсации дисперсии в магистральных каналах связи. Другой областью применения волоконных брэгговских решёток (ВБР) является использование их в различных измерительных системах, контролирующих различные физические величины, такие как: температура, влажность, давление, деформация, содержание химических веществ. Основными характеристиками ВБР являются распределения амплитуды и периода модуляции показателя преломления (ПП), а также эффективного значения наведённого ПП вдоль оси световода. Эти параметры задают спектральные и дисперсионные свойства решёток и, таким образом, определяют их использование в различных приложениях волоконной оптики.

Предложена структура квазираспределённой системы измерения температуры, в которой в качестве датчиков используются волоконные

однородные решётки Брэгга с различным периодом и металлическим покрытием. Смещение брэгговской длины волны отражения под воздействием температуры T описывается формулой:

$$\Delta\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda\left[\left[\alpha_p + \frac{1}{n_{eff}}\frac{dn}{dT}\right]\Delta T\right],$$

где ΔT – изменение температуры; Λ – период ВБР; α_p – результирующий коэффициент линейного теплового расширения, учитывающий коэффициенты линейного теплового расширения и модули Юнга сердцевины, оболочки кварцевой ВБР и металлического покрытия; n_{eff} – эффективный показатель преломления основной моды.

Из результатов численного моделирования сдвига брэгговской длины волны от температуры для случаев с металлическим (никель, алюминий, медь) и полимерным покрытием волоконного световода следует, что графики в окрестности длины волны $\lambda_B = 1550$ нм являются практически линейными до температуры 160 °С. Чувствительность датчика составляет 0,11 нм/°С для алюминиевого покрытия толщиной 70 мкм, обладающего наибольшим температурным коэффициентом теплового расширения из рассматриваемых металлов, и 0,018 нм/°С для полимерного покрытия. Максимально измеряемая температура ограничивается 200 - 250 °С в связи с тем, что из-за термофлуктуаций дифракционная решётка показателя преломления, сформированная в кварцевом волокне, начинает расплываться, в результате, происходит значительное ухудшение спектральных и энергетических характеристик брэгговской решётки. Разрешающая способность волоконно-оптического датчика будет определяться спектральной шириной линии отражения ВБР, минимальный разрешаемый сдвиг которой определяется согласно критерию Рэлея, а также разрешающей способностью используемого спектроанализатора. При использовании оптического спектроанализатора FTVx-5255 фирмы EXFO с разрешением 10 пм точность определения температуры может достигать 0,1 °С при использовании алюминиевого покрытия, в то время как для ВБР с полимерным покрытием при тех же параметрах точность будет составлять 0,6 °С. Для того, чтобы реализовать для рассматриваемого динамического диапазона температур квазираспределённый режим измерений и, чтобы соседние спектры ВБР не накладывались друг на друга, спектральный интервал между брэгговскими длинами волн должен быть не менее 22 нм для ВБР с алюминиевым покрытием и не менее 4,5 нм для ВБР с полимерным покрытием.

И.В. БОГАЧКОВ, А.В. АГАПИТОВ
Омский государственный технический университет

ИЗУЧЕНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛН В МНОГОСЛОЙНЫХ СРЕДАХ

Описана виртуальная лабораторная работа для изучения распространения оптических волн в многослойных средах при различных характеристиках слоёв, которая была разработана в ОмГТУ.

I.V. BOGACHKOV, A.V. AGARITOV
Omsk State Technical University

RESEARCH OF OPTICAL WAVE PROPAGATION IN MULTILAYER MEDIA

A virtual laboratory work for studying the propagation of optical waves in multilayer media with various characteristics of layers which was developed at OmSTU is presented.

В настоящее время большинство вузов перешло на дистанционный формат обучения из-за нестабильной эпидемиологической обстановки. Использование виртуальных лабораторных работ позволяет каждому студенту (независимо от формы обучения) самостоятельно изучать материал, наглядно визуализировать сложные физические процессы.

При нескольких слоях N в структуре профиля $n(r)$ многослойных одномодовых оптических волокнах следует вычислять радиальное распределение амплитуды основной оптической моды $F(r)$ по следующей формуле [1]:

$$F(r) = \begin{cases} C_0 J_0(u_1 r) & \text{при } r \leq a_1, \\ C_{j1} J_0(u_j r) + C_{j2} N_0(u_j r) & \text{при } a_{j-1} < r \leq a_j, \\ C_0 J_0(a_{N-1} u_j) K_0(wr) / K_0(a_{N-1} w) & \text{при } a_{N-1} < r < a_N = b, \end{cases} \quad (1)$$

где $u_j = \sqrt{(n_j^2 \omega_L^2 / c^2 - \beta_L^2)}$, $w = \sqrt{(\beta_L^2 - n_{ог}^2 \omega_L^2 / c^2)}$, j изменяется от 2 до $N-1$, при этом значение u_j может стать комплексным (J_0 превратится в I_0 и т.п.), J_0 и N_0 – обыкновенные функции Бесселя соответственно первого и второго рода нулевого порядка, I_0 и K_0 – модифицированные функции Бесселя первого и второго рода нулевого порядка соответственно, C_i – некоторые константы [1].

В представленной программе моделирование процессов преломления и отражения оптических волн через границы раздела многослойных сред проводится на основе формул Френеля с учётом оптических характеристик при отсутствии «магнитной» границы раздела [2]. После вычислений выводятся графики распространения оптических волн в различных слоях, а также приводятся основные характеристики волн на границах раздела (амплитуды волн, углы преломления, полного отражения и прохождения и т.п.).

На рис. 1 представлен вариант экрана работающей программы.

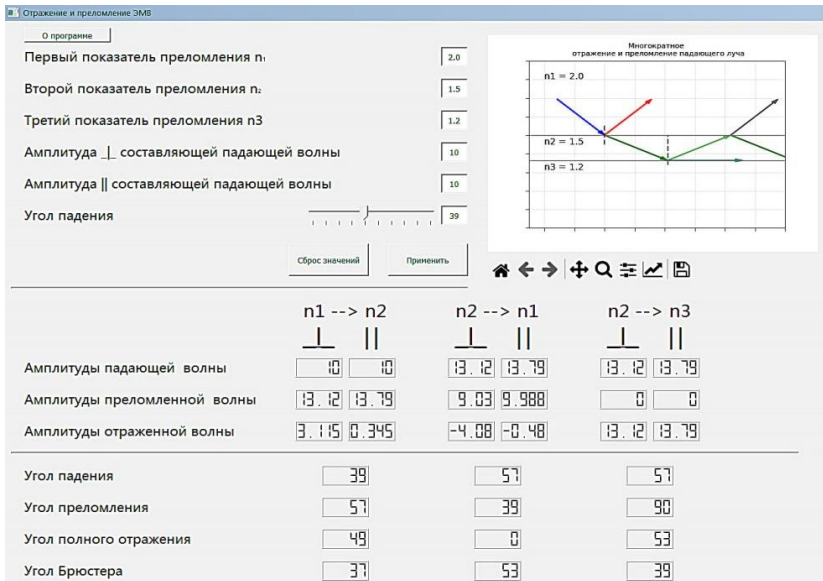


Рис. 1. Скриншот экрана работающей программы

Представленная виртуальная лабораторная работа позволяет студенту самостоятельно изучить материал (дисциплины оптического профиля и «Электродинамика и распространение радиоволн»). Интерактивное взаимодействие с параметрами моделирования положительно сказывается на восприятии и понимании материала.

Список литературы

1. Богачков И.В. Определение профиля спектра рассеяния Мандельштама – Бриллюэна в оптических волокнах различных видов // Вестник СибГУТИ. 2021. Вып. 2. С. 88-99.
2. Богачков И.В. Электромагнитные поля и волны: учеб. пособие: в 2 ч. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014.

И.В. БОГАЧКОВ, А.В. АГАПИТОВ
Омский государственный технический университет

РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ОТРАЖЕНИЯ И ПРЕЛОМЛЕНИЯ ВОЛН НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА СРЕД

Описана виртуальная лабораторная работа для изучения явлений отражения и преломления электромагнитных волн на границе раздела сред, разработанная в ОмГТУ.

I.V. BOGACHKOV, A.V. AGAPITOV
Omsk State Technical University

DEVELOPMENT OF THE VIRTUAL LABORATORY WORK FOR STUDYING REFLECTION AND REFRACTION OF WAVES AT THE MEDIA INTERFACE

A virtual laboratory work to study the phenomena of reflection and refraction of electromagnetic waves at the media interface developed in OmSTU is presented.

Разработка виртуальных лабораторных работ потребовалась для проведения занятий в дистанционной форме. Такие работы оказались полезными для студентов заочной и очно-заочной форм обучений радиотехнических и инфокоммуникационных направлений подготовки, а с марта 2020 г. оказались необходимы и для студентов-очников при переходе на дистанционный формат обучения.

Моделирование процессов преломления и отражения электромагнитных волн (ЭМВ) через границу раздела сред проводится на основе формул Френеля при отсутствии «магнитной» границы раздела [1]. Проводится анализ изменения амплитуд различных поляризационных компонент ЭМВ в зависимости от угла падения и коэффициентов преломления сред.

После запуска программы на рабочей панели (рис. 1) можно условно выделить такие области, отделённые друг от друга цветными рамками. В первой области можно увидеть поля для ввода показателей преломления исследуемых сред, амплитуд перпендикулярной и параллельной составляющих падающей ЭМВ и угла падения. После нажатия кнопки «Применить» производятся расчёты, выводятся результаты (вторая область: угол преломления, угол полного внутреннего отражения, угол

Брюстера, амплитуды перпендикулярной и параллельной составляющих отражённой и преломленной волны, коэффициенты отражения и прохождения) и строятся графики (третья область: график отражения и преломления падающего луча и т.п.). На верхнем графике более плотная среда помечена бледно-голубым цветом. Нижний график показывает зависимости от угла падения (от 0 до 90°) коэффициентов отражения и преломления для данных сред, амплитуд перпендикулярной и параллельной составляющих отражённой волн, отношение амплитуд отражённой и падающей волн, а также поперечное сечение преломленного луча. Во второй области (а также на графиках в нижнем правом углу экрана) можно наблюдать, как при изменении угла падения изменяются характеристики отражённой и преломленной волн.

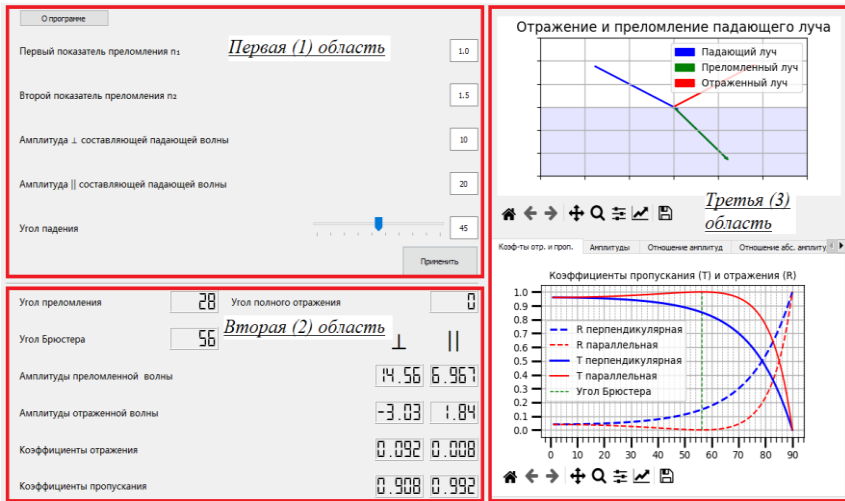


Рис. 1. Рабочая панель ПО (с демонстрацией областей экрана)

Данная виртуальная лабораторная работа позволяет студенту самостоятельно более глубоко освоить материал (дисциплины «Электродинамика и распространение радиоволн», «Оптические направляющие среды» и другие дисциплины оптического профиля). Интерактивное взаимодействие с параметрами моделирования положительно сказывается на восприятии и понимании материала.

Список литературы

1. Богачков И.В. Электромагнитные поля и волны: учеб. пособие: в 2 ч. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014.

И.В. МИНИН, О.В. МИНИН
Томский политехнический университет

ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В МЕЗОРАЗМЕРНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТРЁХ- И ДВУМЕРНЫХ СТРУКТУРАХ

В течение последнего десятилетия в исследованиях по оптике диэлектрических мезоразмерных частиц произвольной трёхмерной формы и решёток с параметром $q \sim 10$ были обнаружены новые необычные явления. В докладе обсуждаются физические механизмы, лежащие в основе этих явлений. Наличие целого ряда интересных приложений свидетельствует о том, что в оптике, акустике и плазмонике возникло новое перспективное направление.

I.V. MININ, O.V. MININ
Tomsk Polytechnic University

OPTICAL PHENOMENA IN MESOSCALE DIELECTRIC THREE- AND TWO-DIMENSIONAL STRUCTURES

During the last decade, new unusual phenomena in studies on the optics of dielectric mesoscale particles of arbitrary three-dimensional shape and gratings with Mie size parameter $q \sim 10$ have been discovered. The report provides an overview of these phenomena. The presence of a number of interesting applications indicates that a new promising direction has emerged in optics, acoustics, and plasmonics.

Структуры поля с параметром размера $q \sim 10$ ($q = 2\pi R/\lambda n$, где R – радиус сферы, n – показатель преломления частицы, λ – длина волны излучения), лежащие в области между нано- ($q \sim 1$), волновой и геометрической оптикой ($q > 100$), ранее были малоизучены. За последние десять лет в исследованиях по оптике диэлектрических мезоразмерных частиц произвольной трёхмерной формы и решёток [1, 2] с параметром $q \sim 10$ были обнаружены новые необычные явления. К ним относятся: фотонные наноструи [3 - 5], тераструи [6, 7] и акустические струи [8] как в режиме на прохождение, так и отражение [9 - 12], структурированные поля в виде фотонных крючков и петель [13 - 18], оптические нановихри [19], эффекты аномальной аподизации частиц [20 - 22] и решёток [23], Фано-резонансы в диэлектрической Ми-резонансной мезофотонике [24], эффекты преодоления дифракционного предела [25 - 29], аномальный сдвиг фазы Гои [30, 31], эффекты генерации гигантских магнитных [24] и акустических [32] полей, плоские зеркала [33]. Некоторые из

перечисленных эффектов нашли своё подтверждение также в терагерцовой оптике, акустике и плазманике [34 - 41].

Наличие также целого ряда новых приложений свидетельствует о том, что в оптике, акустике и плазманике возникло новое перспективное направление.

Список литературы

1. Minin I.V., Minin O.V. // Vestnik NSU. 2014. V. 12(4). P. 59.
2. Minin I.V., et al. // Ann. Phys. (Berlin). 2015. V. 527(7-8). P. 491.
3. Luk`yanchuk B., et al. // Opt. Mat. Express. 2017. V. 7. P. 1820.
4. Liu C., et al. // EPL. 2018. V. 123. P. 54003.
5. Minin I.V., et al. // Opt Express. 2020. V. 28(15). P. 22690.
6. Pacheco-Pena V., et al. // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 105. P. 084102.
7. Pacheco-Pena V., et al. // Opt. Lett. 2015. V. 40(2). P. 7.
8. Minin O.V. Minin I.V. // Opt. and Quant. Electron. 2017. V. 49. P. 54.
9. Minin I.V., et al. // Opt. Lett. 2015. V. 40. P. 2329.
10. Minin I.V., et al. // Opt. Lett. 2016. V. 41(4), P. 3.
11. Yue L., et al. // Ann. Phys. (Berlin). 2018. V. 530(6). P. 1800032.
12. Minin I.V., Minin O.V. // Opt. Mat. 2021. V. 112C. P. 110770.
13. Yue L., et al. // Opt. Lett. 2018. V. 43(4). P. 31.
14. Ang A., et al. // Sci Rep. 2018. V. 8. P. 2029.
15. Minin I.V., et al. // APL. 2019. V. 114(3). P. 031105.
16. Minin I.V., et al. // Opt. Lett. 2020. V. 45(17). P. 4899.
17. Spector M., et al. // Nanoscale Advances. 2020. V. 2. P. 5312.
18. Pacheco-Peña V., et al. // Sci Rep. 2021. V. 11. P. 20278.
19. Yue L., et al. // Sci Rep. 2019. V. 9. P. 20224.
20. Yue L., et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2017. V. 50. P. 311.
21. Yue L., et al. // Ann. Phys. (Berlin). 2018. V. 530. P. 1700384.
22. Yue L., et al. // J. of IR, Millimeter and THz Waves. 2018. V. 39(6). P. 546.
23. Geints Y., et al. // Ann. Phys. (Berlin). 2019. V. 531(7). P. 1900033.
24. Wang Z.B., et al. // Sci Rep. 2019. V. 9. P. 20293.
25. Pham H.H., et al. // APL Photonics. 2017. V. 2. P. 056106.
26. Minin I.V., Minin O.V. // Opt. and Quant. Electron. 2017. V. 49. P. 326-329.
27. Cao Y., et al. // Nanomaterials. 2019. V. 9(2). P. 186.
28. Minin I.V., et al. // Sci Rep. 2019. V. 9. P. 12748.
29. Yue L., et al. // Ann. Phys. (Berlin). 2020. V. 352(10). P. 2000373.
30. Pham H.H., et al. // APL. 2016. V. 108. P. 191102.
31. Pham H.H., et al. // APL. 2017. V. 110(20). P. 201105.
32. Minin I.V., et al. // Proc. Mtgs. Acoust. 2019. V. 38. P. 070001.
33. Minin I.V., et al. // Sci Rep. 2020. V. 10. P. 8459.
34. Perez-Lopez S., et al. // Appl. Phys. Express. 2019. V. 12. P. 087001.
35. Rubio C., et al. // Results in Physics. 2020. V. 6. P. 102921.
36. Tarrázó-Serrano D., et al. // Ultrasonics. 2020. V. 106. P. 106143.
37. Pacheco-Peña V., et al. // Photonics. 2016. V. 3. P. 10.
38. Pacheco-Peña V., et al. // Ann. Phys. (Berlin). 2016. V. 528(9-10). P. 684.
39. Minin I.V., et al. // Ann. Phys. (Berlin). 2018. V. 530(12). P. 1800359.
40. Minin I.V., et al. // Opt. Lett. 2020. V. 45(12). P. 3244.
41. Minin I.V., et al. // APL. 2021. V. 118(13). P. 131107.

А.А. ГОШЕВ, М.К. ЕСЕЕВ, Д.Н. МАКАРОВ

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова

АНАЛИЗ СПЕКТРОВ РАССЕЯНИЯ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА НАНОТРУБКЕ

В работе приведены результаты расчёта спектра рассеяния ультракороткого импульса электромагнитного поля на углеродной и кремниевой нанотрубках. Взаимодействие с мишенью считается внезапным, электронная плотность рассчитывается в рамках модели Дирака-Хартри-Фока-Слейтера учитывается магнитная составляющая налетающего импульса.

A.A. GOSHEV, M.K. ESEEV, D.N. MAKAROV

North (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov

ANALYSIS OF THE SCATTERING SPECTRA OF ULTRA-SHORT ELECTROMAGNETIC FIELD PULSES ON A NANOTUBE

This paper presents the results of calculating the scattering spectrum of an ultrashort pulse of an electromagnetic field on carbon and silicon nanotubes. The interaction with the target is considered sudden, the electron density is calculated within the Dirac-Hartree-Fock-Slater model, the magnetic component of the incident pulse is taken into account.

В настоящее время активно ведутся исследования в области наноматериалов, наноструктур и композитов на их основе. Интерес вызывают как фундаментальные, так и прикладные свойства таких объектов, что позволяет использовать их в широком классе оборудования, материалов и устройств. Большая функциональность наноматериалов возможна при условии точного контроля геометрии и дефектов их поверхности.

Рентгеновская абсорбционная спектроскопия, рентгеновский дифракционный анализ вещества (XRD) на сегодняшний день являются одними из лучших инструментов для изучения химической модификации поверхности и структурных дефектов. В последнее время разработаны методы, сочетающие лазерные и рентгеновские разработки, с использованием ультракоротких импульсов (УКИ) [1 - 3]. Уникальность

этих методов заключается в способности генерировать колоссальную энергию в небольшом временном и пространственном масштабе.

В работе представлен теоретический расчёт спектров рассеяния УКИ гауссовой формы на углеродных (рис. 1) и кремниевых нанотрубках. Взаимодействие электронов многоатомной системы с полем ультракоротких импульсов считалось внезапным. Структура углеродных нанотрубок моделировалась группой аксиально-симметричных колец. Одной из особенностей рассеяния является генерация второй гармоники при учёте магнитной составляющей в поле УКИ [3]. Выявлены характерные особенности в спектре рассеяния на первой и второй гармониках.

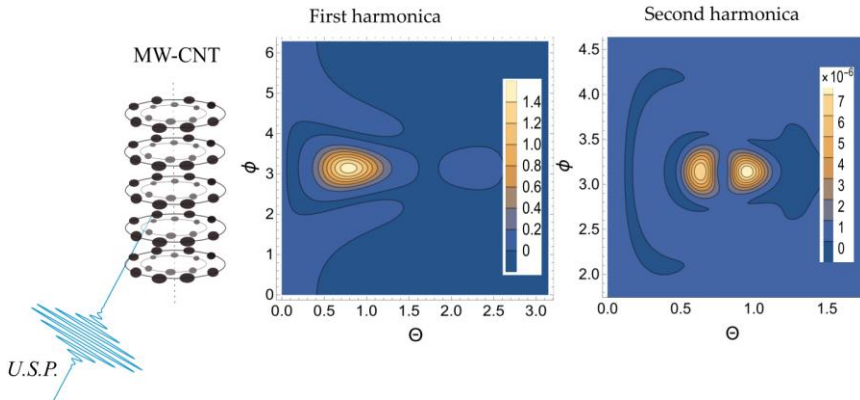


Рис 1. Контурная диаграмма спектра рассеяния ультракороткого импульса на многослойной углеродной нанотрубке, частота импульса $\omega_0 = 100$ а.е., длительность $\tau = 43$ ас, амплитуда $E_0 = 1000$ а.е.

Список литературы

1. Zewail A. // The Journal of Physical Chemistry A. 2000. V. 104 (24). P. 5660-5694.
2. Krausz F., Ivanov M. // Rev. Mod. Phys. 2009. V. 81 (1). P. 163-234.
3. Makarov D.N., Eseev M.K. // Optics Letters, 2019. V. 44 (12). P. 3042-3045.

В.А. ХАЛЯПИН, А.Н. БУГАЙ¹*Калининградский государственный технический университет*¹*Объединенный институт ядерных исследований, Дубна***ОБ УСТОЙЧИВОСТЬ ОПТИЧЕСКИХ ПУЛЬСОВ,
РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В РЕЖИМЕ ИОНИЗАЦИИ**

Проведено аналитическое исследование динамики импульсов, распространяющихся в среде с фотоионизацией и найдено стационарное решение. С помощью метода Ляпунова получен критерий устойчивого распространения.

V.A. KHALYAPIN, A.N. BUGAY¹*Kaliningrad State Technical University*¹*Joint Institute of Nuclear Researches, Dubna***ON THE STABILITY OF LIGHT BULLETS PROPAGATION
IN THE IONIZATION REGIME**

An analytical study of the pulse dynamics in a medium with photoionization is carried out and stationary solution was obtained. Using the Lyapunov method a stability criterion for such pulses is obtained.

В настоящей работе предложен подход определения параметров световой пули, при которой она будет распространяться в квазиустойчивом режиме. Такой режим возможен в области аномальной дисперсии групповых скоростей. Для подавляющего большинства сред параметр Келдыша в этой области меньше единицы, что соответствует области туннельной ионизации. Отталкиваясь от метода медленно меняющейся огибающей, запишем эволюционное уравнение

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi}{\partial z} + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \tau^2} - \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 \psi}{\partial \tau^3} - i\gamma\psi|\psi|^2 + \frac{\gamma}{\omega} \frac{\partial}{\partial \tau} (\psi|\psi|^2) - \frac{i\mu}{2} \Delta_{\perp} \psi + \Phi \frac{W}{|\psi|^2} \psi + \\ + i\gamma\alpha\psi \int_0^{\infty} R(\tau - \tau') |\psi(\tau')|^2 d\tau' + \eta_n \left(\frac{1}{\omega\tau_c} + i \right) \psi \int_{-\infty}^{\tau} W d\tau' = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь ψ – медленно меняющаяся огибающая, z – ось, вдоль которой распространяется сигнал, скорость импульса на его центральной частоте ω , $\eta_n\sigma_n$ – коэффициенты, характеризующие вклад ионизации, $\mu = c / n_0\omega$,

n_0 – показатель преломления среды на нулевой частоте, $\beta_2\beta_3$ – определяют вклад дисперсии второго и третьего порядка соответственно, γ – коэффициент кубической нелинейности, α – Рамановский параметр. $R(t)$ – Рамановская функция отклика, τ_c – характерное время столкновений электронов с атомами, слагаемое при Φ описывает поглощение фотонов, W – степень ионизации.

Анализ динамики параметров импульса проводился на основе метода моментов с пробной функцией

$$\psi = B \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\tau - T}{\tau_p} \right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{r}{R} \right)^2 + \right. \\ \left. + i \left(\phi + \Omega(\tau - T) - C \frac{(\tau - T)^2}{2\tau_p^2} - \frac{\varepsilon r^2}{2R^2} \right) \right], \quad (2)$$

где B – амплитуда сигнала, R – параметр, пропорциональный радиусу сигнала, ε – описывает кривизну волновых поверхностей, τ_p – параметр, пропорциональный длительности импульса, C – характеризует частотную модуляцию, T – описывает временное запаздывание, ϕ – фаза, Ω – сдвиг частоты импульса. Все параметры зависят от координаты z .

Была получена системы уравнений на параметры импульса из которой найдено стационарное решение для длительности и радиуса световой пули. Анализ устойчивости стационарного решения по методу Ляпунова показал, что решение устойчиво, если выполняется условие на интенсивность импульса (найденно окно интенсивностей, при которых оптическая пуля может быть квазиустойчивой).

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (грант № 075-022021-1748).

И.Н. ЗАХАРОВ

Кубанский государственный университет, Краснодар

ЭНЕРГИЯ ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ В БАЛАНСНО-МОДУЛИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЕ

Приведены результаты вычислений энергии заряженной частицы в поле балансно-модулированной волны. Определены средняя кинетическая энергия частицы и оптимальный диапазон, в котором энергия максимально эффективна.

I.N. ZAKHAROV

Kuban State University, Krasnodar

ENERGY OF A CHARGED PARTICLE IN A BALANCED-MODULATED ELECTROMAGNETIC WAVE

The results of calculating the energy of a charged particle of a balanced-modulated wave are given. The average kinetic energy of the particle and the optimal range in which the energy is the most effective field are determined.

Передача и получение сигналов или данных осуществляются путём комплексных процессов, используя сложные сценарии в системах связи. Актуальность изучения взаимодействия частиц с модулированным направленным высококогерентным излучением квантовых оптических генераторов возрастает. Для них необходимо освоение новых диапазонов спектра электромагнитной волны [1].

Целью работы является оценка влияния балансно-модулированной волны на траекторию движения релятивистской заряженной частицы.

Необходимость использования модуляции при передаче информации обусловлена тем, что в большинстве случаев характеристики сигнала непригодны для передачи по каналу связи [2].

Для анализа частицы, которая подвергается воздействию поля электромагнитной волны, в первую очередь необходимо рассмотреть энергетические характеристики самой частицы. Уравнение движения частицы в поле излучённой электромагнитной волны имеет вид уравнения силы Лоренца [3]. При исследовании влияния электромагнитного поля на заряженную частицу пользуемся принципом наименьшего действия. Это позволяет выразить связь между импульсом, скоростью и энергией в заряженной частице. Зная функцию Лагранжа, определяем, по какому закону описывается импульс заряженной частицы. Нахождение координат

частицы осуществляется с помощью формул для компонент импульса, полученных ранее. В конечном итоге, средняя кинетическая энергия частицы, которая подвергается воздействию электромагнитного поля балансно-модулированной (БМ) волны, выражается равенством:

$$\langle \bar{\varepsilon}_{БМ} \rangle - mc^2 = \frac{mc^2 \mu J_n^2(\delta_{(АМД)})}{4(1+n\alpha)^2} \times \left(\frac{16 \left(\mu \sum_{n=-N}^N \frac{J_n^2(\delta_{(АМД)})}{(1+n\alpha)^2} + 2 \right) - \mu \sum_{n=-N}^N \frac{J_n^2(\delta_{(ЧМО)})}{(1+n\alpha)^2} + (8a + \tilde{\rho}^2)}{2 \sqrt{(4 - \tilde{\rho}^2) \mu^2 \sum_{n=-N}^N \frac{J_n^4(\delta_{(АМД)})}{(1+n\alpha)^4} + 16 \mu \sum_{n=-N}^N \frac{J_n^2(\delta_{(ЧМО)})}{(1+n\alpha)^2} + 16}} \right).$$

Разности средних кинетических энергий частицы $\Delta\langle \bar{\varepsilon} \rangle = \langle \bar{\varepsilon}_{(ОАМ)} \rangle - \langle \bar{\varepsilon}_{(ОБМ)} \rangle$ в поле БМ волн от $\hat{\alpha}$ (отношение модулируемой частоты к несущей) представлены на рис. 1.

Фактически при $\hat{\alpha} = 0$ энергия БМ волны в 2,3 раза выше энергии монохроматической при линейной поляризации и в 1,8 раза выше при круговой. А максимальная эффективность энергии БМ волны по сравнению с обычной достигается при значениях $\hat{\alpha}$ в диапазоне 1.1 - 1.2.

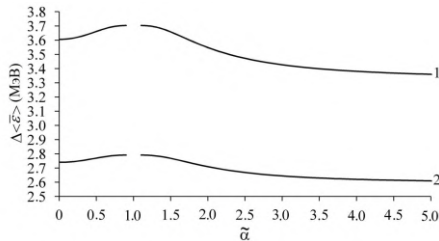


Рис. 1. Разности средних кинетических энергий в поле балансно-модулированных волн для случаев линейной (1) и круговой (2) поляризации

Список литературы

1. Копытов Г.Ф., Оксюзян С.С., Тлячев В.Б. К вопросу о характеристиках излучения электрона в модулированном электромагнитном поле // Известие высших учебных заведений. Физика. 1986. Т. 29. № 4.
2. Holkundkar A., Brodin G., Marlund M. Proton acceleration by circularly polarized traveling electromagnetic wave // Physical Review Accelerators and Beams. 2012. V. 15.
3. Esarey E., Sprangle P., Krall J. Laser acceleration of electrons in vacuum // Phys. Rev. E. 1995. V. 52. № 5.

А.А. КРАЙСКИЙ, А.В. КРАЙСКИЙ¹

¹*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

**ЗНАЧИТЕЛЬНОЕ УВЕЛИЧЕНИЕ АМПЛИТУДЫ
ВОЛНОВОЙ ФУНКЦИИ НЕРЕЛЯТИВИСТСКОЙ
ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ, ПАДАЮЩЕЙ
НА КРИСТАЛЛ ПРИ ОДНОМЕРНОМ ПРИБЛИЖЕНИИ**

Теоретически показано увеличение амплитуды волновой функции нерелятивистской заряженной частицы проходящей сквозь одномерный кристалл. Уменьшение скорости частицы приводит к увеличению амплитуды волновой функции. Это соответствует экспериментам, в которых наблюдалось увеличение выхода реакций D–D для частиц с низкой энергией по сравнению со значениями, рассчитанными с помощью экстраполяции данных из области высоких энергий.

A.A. KRAISKI, A.V. KRAISKI¹

¹*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

**SIGNIFICANT INCREASE IN THE AMPLITUDE
OF THE WAVE FUNCTION OF A NONRELATIVISTIC
CHARGED PARTICLE FALLING ON A CRYSTAL
AT ONE-DIMENSIONAL APPROXIMATION**

Theoretically shown an increase in the amplitude of the wave function of a nonrelativistic charged particle passing through a one-dimensional crystal. A decrease in the velocity of the particle leads to an increase in the amplitude of the wave function. This is consistent with experiments in which an increase in the D–D reaction yield was observed for low-energy particles as compared to the values calculated by extrapolating data from the high-energy region.

Определение сечений D–D реакций при энергиях меньших 100 кэВ затруднено вследствие их малости. Поэтому в экспериментах на ускорителях применяются твердотельные мишени, содержащие имплантированный дейтерий (например, [1]). При этом по сравнению со значениями, полученными экстраполяцией из области высоких энергий выход D–D-реакции значительно увеличивается. Это обнаружено в большинстве исследованных металлов. В [2, 3] исследовано свыше 70 элементов периодической системы. В качестве возможной причины увеличения выхода в [4, 5] было высказано предположение о возможности увеличения амплитуды волновой функции налетающих частиц внутри

кристалла по сравнению с амплитудой в отсутствие кристалла. Это обосновывалось сходством уравнения Шредингера для волновой функции нерелятивистской частицы в одномерном периодическом потенциале и волнового уравнения для света в одномерной плоско-слоистой среде и схожестью граничных условий. Откуда следовало, что для частицы, как и для света, должна быть запрещённая энергетическая зона и вблизи неё окна прозрачности, в которых, как и для света, должно наблюдаться увеличение амплитуды волновой функции.

В [6] был разработан метод решения подобной задачи для световой волны. Волновая функция в кристалле будет являться суммой двух волн Блоха. Считая, что отстройка энергии частицы (и, соответственно, волнового числа Δq) от края разрешённой зоны мала, в работе построена теория возмущения по Δq . Как и было предположено в [4, 5] свойства волновой функции частицы с энергиями, близкими к краю разрешённой зоны, оказались похожи на свойства световой волны [6]. Увеличение амплитуды волновой функции в окне прозрачности (области энергетического спектра частиц с высоким коэффициентом прохождения сквозь кристалл вблизи запрещённой зоны) пропорционально толщине кристалла и обратно пропорционально номеру окна, отсчитанному от запрещённой зоны, Ширина окна прозрачности пропорциональна квадрату номера окна и обратно пропорциональна кубу толщины кристалла. Это имеет место при любой зависимости одномерного периодического потенциала от глубины. С помощью расчётов по этому методу установлено, что известный в литературе значительный рост увеличения выхода реакции при уменьшении энергии падающей частицы действительно соответствует увеличению квадрата амплитуды волновой функции, который может составлять более 10^5 раз.

Список литературы

1. Багуля А.В., Далькаров О.Д., Негодаев М.А. и др. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2012. Т. 39. № 9. С. 3.
2. Raiola F., Migliardi P., Gyurky G., et al. // Eur. Phys. J. A. 2002. V. 13. P. 377.
3. Raiola F., Migliardi P., Gang L., et al. // Phys. Lett. B. 2002. V. 547. P. 193.
4. Крайский А.А., Крайский А.В. О возможном механизме повышения выхода низкоэнергетических ядерных реакций в кристаллических структурах // VI Международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сб. научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2017. С. 55.
5. Крайский А.А., Крайский А.В. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2020. № 2. С. 20.
6. Крайский А.А., Крайский А.В. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2018. № 2. С. 37.

Л.Е. СЕМЕНОВА

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

РЕЗОНАНСНОЕ ГИПЕРКОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА НА ТО-ФОНОНАХ В КРИСТАЛЛЕ CdS

В работе представлены результаты теоретического анализа гиперкомбинационного рассеяния света на ТО-фононах в кристалле CdS структуры вюрцита при двухфотонном возбуждении вблизи нижнего экситонного уровня.

L.E. SEMENOVA

Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

RESONANT HYPER-RAMAN SCATTERING OF LIGHT BY TO-PHONONS IN A CdS CRYSTAL

The paper presents the results of theoretical analysis of the hyper-Raman scattering of light by TO-phonons in a CdS crystal with the wurtzite structure under two-photon excitation near the lowest exciton level.

Резонансное гиперкомбинационное рассеяние (ГКР) света впервые наблюдалось в 1979 году в кристалле CdS, где условия резонанса изменялись в зависимости от температуры образца [1]. Позже было опубликовано несколько работ, посвящённых ГКР на продольных оптических (LO) фононах в CdS [2 - 4]. В частности, наблюдалось рассеяние на 2LO- и 3LO-фононах [3, 4]. Однако, резонансное ГКР на поперечных оптических (ТО) фононах в отличие от комбинационного рассеяния (КР) не было обнаружено.

Представленная работа посвящена анализу резонансного ГКР света на ТО-фононах в рамках модели, рассматривающей в качестве промежуточных состояний электронной системы водородоподобные экситоны Ванье. При этом учитывались волновые функции валентной зоны, полученные в работе [5].

Экситон-решёточное взаимодействие через деформационный потенциал [6, 7] ведет к переходу между водородоподобными экситонными состояниями без изменения орбитального квантового числа [8, 9]. Следовательно, заметный вклад в ГКР на ТО-фононах может вносить механизм рассеяния, который описывается как двухфотонный дипольный переход в экситон s-типа и непрямой переход в основное

состояние. На первый взгляд этот процесс ГКР аналогичен резонансному КР и мог бы привести к появлению ТО линии в спектрах рассеяния при двухфотонном возбуждении вблизи резонанса с $1s$ экситонным состоянием.

Ранее в экспериментах наблюдалось увеличение интенсивности ГКР на ЛО-фононах при приближении к экситонным резонансам [4], которое позже объяснялось механизмом рассеяния, включающим двухфотонные переходы в s -экситоны [10]. При геометрии рассеяния, используемой в эксперименте, возможны процессы ГКР, которые включают двухфотонные дипольные переходы в s -экситонные состояния симметрии Γ_1 или Γ_6 . В случае А экситонов происходит двухфотонный переход в дипольно-запрещённое состояние Γ_6 , непрямой переход из которого разрешен только с одновременным рождением $E_1(\text{ТО})$ фонона. В тоже время непрямой переход из дипольно-разрешённого А экситона s -типа Γ_5 возможен с одновременным рождением как $A_1(\text{ТО})$, так и $E_1(\text{ТО})$ фононов. Выражения, описывающие непрямые переходы в основное состояние, для ГКР и КР на $E_1(\text{ТО})$ фононах существенно различаются. Их анализ осложняется тем, что неизвестны некоторые параметры и матричные элементы. Но было показано, что в определённых случаях резкого увеличения сечения ГКР на $E_1(\text{ТО})$ фононах при приближении к резонансу может не происходить.

Механизм резонансного ГКР света на $A_1(\text{ТО})$ фононах может быть связан с двухфотонными переходами в s -экситоны В или С серий, и, следовательно, аналогичен наблюдаемому ранее КР на $A_1(\text{ТО})$ фононах [11]. Но в случае ГКР также возможен другой процесс рассеяния, которому соответствует последовательность промежуточных экситонных состояний А серии s - p - p . Отсутствие $A_1(\text{ТО})$ линии в спектрах ГКР при возбуждении ниже экситонных резонансов можно объяснить, если предположить, что вклады этих процессов разных знаков.

Список литературы

1. Поливанов Ю.Н., Саяхов Р.Ш. // Письма в ЖЭТФ. 1979. Т. 30 (9). С. 617.
2. Inoue K., Minami F., et al. // J. Cryst. Growth. 1992. V. 117. P. 738.
3. Зубкова Л.Е., Ондриаш К.К. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1993. Т. 57 (6). С. 334.
4. Maslov V.A., Ondriash K.K., et al. // Las. Phys. 1996. V. 6. P. 132.
5. Gutsche E., Jahne E. // Phys. Stat. Sol. 1967. V. 19. P. 823.
6. Бир Г.Л., Пикус Г.Е. // ФТТ. 1960. Т. 2 (9). С. 2287.
7. Martin R.M. // Phys. Rev. B. 1971. V. 4. P. 3676.
8. Garcia-Cristobal A., Cantarero A., et al. // Phys. Rev. B. 1998. V. 58. P. 10443.
9. Semenova L.E., Prokhorov K.A. // ЖЭТФ. 2003. Т. 123 (5). С. 1048.
10. Semenova L.E., Prokhorov K.A. // Las. Phys. Lett. 2004. V. 1. P. 253.
11. Martin R.M., Damen T.C. // Phys. Rev. Lett. 1971. V. 26. P. 86.

А.А. КРАЙСКИЙ, А.В. КРАЙСКИЙ¹

¹*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

О ГРУППОВОЙ СКОРОСТИ УЗКОПОЛОСНОГО ИМПУЛЬСА В ПРЕДЕЛАХ ОКНА ПРОЗРАЧНОСТИ ВОЗЛЕ ЗАПРЕЩЁННОЙ ЗОНЫ ОДНОМЕРНОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА

С помощью теории возмущений в общем случае одномерного ограниченного фотонного кристалла исследовано прохождение спектрально узкого импульса, спектр которого сосредоточен в центре окна прозрачности, расположенного возле запрещённой зоны. Полученные аналитические выражения для времени и скорости прохождения импульса сквозь фотонный кристалл выражены через поля при квазиимпульсе q_0 , соответствующем границе зоны.

A.A. KRAISKI, A.V. KRAISKI¹

¹*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

ON THE GROUP VELOCITY OF A NARROWBAND PULSE WITHIN THE LIMITS OF THE TRANSPARENCY WINDOW NEAR THE FORBIDDEN ZONE OF A ONE-DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTAL

Using perturbation theory in the general case of a one-dimensional bounded photonic crystal, the transmission of a spectrally narrow pulse, the spectrum of which is concentrated in the center of the transparency window located near the forbidden zone, is investigated. The obtained analytical expressions for the time and velocity of the pulse passing through the photonic crystal are expressed in terms of the fields at the quasimomentum q_0 corresponding to the zone boundary.

Продолжают представлять большой интерес исследования прохождения светового импульса через фотонный кристалл (ФК) [1 - 5] в тех частотных областях, в которых велика его задержка. Их называют областями так называемого «медленного» света (см., например, [6]). Они прилегают к запрещённой зоне ФК. При определённых условиях пропускание света в них велико, они узки, и образуют окна прозрачности (ОП). В настоящей работе рассматривалось время и скорость прохождения импульса через ФК для диапазона частот, центр которого совпадает с центром окна прозрачности (задержка импульса здесь максимальна).

Следуя [7], для этих условий, построена теория возмущений по малой отстройке волнового числа волны в кристалле от границы зоны.

Для скорости и времени прохождения такого спектрально узкого импульса через фотонный кристалл конечной толщины, получены аналитические выражения, применимые при произвольном профиле диэлектрической проницаемости (ДП) на периоде фотонного кристалла. Эти аналитические выражения для времени и скорости прохождения импульса сквозь фотонный кристалл выражены через поля при квазиимпульсе q_0 , соответствующем границе запрещённой зоны. Скорость импульса пропорциональна квадрату номера ОП и обратно пропорциональна квадрату толщины кристалла. Она растёт с уменьшением соответствующей фурье-компоненты переменной части ДП, выходя на обратную квадратичную зависимость в случае малых амплитуд изменений, причём в последнем случае выражения для скорости приобретают особенно простой вид.

Если диэлектрическая проницаемость внешней среды отлична от среднего значения ДП кристалла, то положения среза фотонного кристалла на его периоде могут влиять на скорость импульса. При малых вариациях ДП ФК эта зависимость исследована подробнее. При этом скорости импульсов в ОП сверху и снизу от рассматриваемой запрещённой зоны изменяются в одних и тех же пределах, но в противофазе.

Список литературы

1. Наседкина Ю.Ф., Елисеева С.В., Семенцов Д.И. // Оптика и спектроскопия. 2015. Т. 119. № 1. С. 133-139.
2. Золотовский И.О. Коробко Д. А. Остаточников В.А. // Квантовая электроника. 2015. Т. 45. № 2. С. 136-142.
3. Казанов Д.Р., Пошакинский А.В., Шубина Т.В. // Письма в Журн. эксп. и теор. физики. 2017. Т. 105. Вып. 1. С. 10-14.
4. Chen C.-W., et al. // Optical Materials Express. 2017. V. 7. No. 6. P. 2005.
5. Крайский А.А., Крайский А.В., Казарян М.А., Захарян Р.А. // Фотоника. 2018. Т. 12. № 8 (76). С. 802-822.
6. Baba T. // Nat. Photonics. 2008. V. 2. P. 465.
7. Крайский А.А., Крайский А.В. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2018. № 2. С. 37-46.

Н.И. ПЕТРОВ

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ВИХРЕВЫХ ПУЧКОВ СВЕТА В ГРАДИЕНТНОМ НАНОВОЛОКНЕ

Исследовано влияние спин-зависимых эффектов на вихревые световые пучки, распространяющиеся в градиентном волокне, с помощью решения полных трёхкомпонентных уравнений Максвелла с использованием теории возмущений.

N.I. PETROV

Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow

PROPAGATION OF POLARIZED VORTEX LIGHT BEAMS IN GRADED-INDEX NANOFIBERS

Spin-dependent effects on vortex light beams propagating in a graded-index fiber are demonstrated by solving the full three-component field Maxwell equations using the perturbation analysis.

В скалярном приближении световой пучок, распространяющийся в неоднородной среде, управляется силами дифракции и преломления. Однако последовательная электромагнитная теория распространения света должна основываться на векторных уравнениях Максвелла. Когда рассматривается векторное волновое поле, следует учитывать влияние дополнительных эффективных сил, связанных с поляризацией (спиновым угловым моментом (SAM)) и орбитальным угловым моментом (OAM). Хорошо установлено, что вектор поляризации линейно поляризованных оптических пучков, распространяющихся по спиральной траектории, подвергается вращению Рытова [1 - 5].

В настоящей работе исследуется влияние поляризации (спина) и орбитального углового момента на характеристики вихревого светового пучка с ненулевым радиальным числом, распространяющегося в цилиндрическом волноводе с градиентным профилем показателя преломления. Исследована фокусировка линейно и циркулярно-поляризованных вихревых световых пучков в цилиндрическом волокне. Анализируется изменение профиля пучка с расстоянием с учётом спин-орбитального и непараксиального эффектов. Продемонстрирован эффект периодического возобновления волновых пакетов вследствие интерференции мод в цилиндрическом оптическом волокне.

На рис. 1 показаны распределения интенсивности циркулярно-поляризованных пучков с различными азимутальными l и радиальными p индексами в поперечной начальной плоскости и на расстояниях возобновления в градиентном нановолокне.

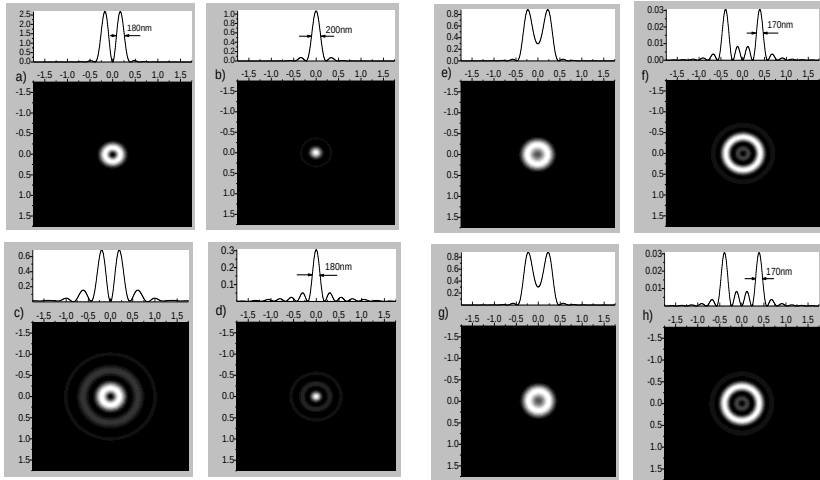


Рис. 1. Профили интенсивности поперечных составляющих электрического поля (a, c, e, g) и продольных составляющих электрического поля (b, d, f, h) в начальной плоскости $z = 0$ (a, b, e, f) и на расстояниях возобновления $z = 38.47$ мм (c, d) и $z = 38.45$ мм (g, h): (a - d) $p = 0$, $l = 1$, $s = -1$; (e - h) $p = 1$, $l = 0$, $s = 1$

Показано, что пучки с антипараллельными OAM и SAM могут быть сфокусированы в меньшие области, чем те, в которых эти угловые моменты параллельны. Векторные модовые решения, демонстрирующие запутанность между спином (поляризацией) и OAM (сингулярностью волнового фронта), могут быть полезны для классических реализаций квантовой связи и вычислительных задач.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного задания № 0057-2019-0006 и гранта РФФИ № 19-29-11026.

Список литературы

1. Zel'dovich B.Ya., Kundikova N.D. // Quant. Elect. 1995. V. 25. P. 172-174.
2. Petrov N.I. // J. Mod. Opt. 1996. V. 43. P. 2239-2249.
3. Petrov N.I. // Opt. Lett. 2013. V. 38. P. 2020-2022.
4. Petrov N.I. // J. Opt. Soc. Am. A. 2016. V. 33. P. 1363-1369.
5. Petrov N.I. // Fibers. 2021. V. 9(6). P. 34.

И.В. МИНИН, О.В. МИНИН
Томский политехнический университет

**ОПТИЧЕСКАЯ ЛОВУШКА НА ОСНОВЕ $\pi/2$
СЕГМЕНТИРОВАННОГО ЦИЛИНДРА И ФОТОННЫЙ
КРЮЧОК В НЕОДНОРОДНОЙ (ГРАДИЕНТНОЙ) СРЕДЕ**

В работе предложен новый тип оптической ловушки в поле стоячей волны на основе сегментированного цилиндра и новый метод формирования фотонного крючка на основе однородной сферической или цилиндрической частицы, помещённой в градиентную среду в области её теневой поверхности.

I.V. MININ, O.V. MININ
Tomsk Polytechnic University

**OPTICAL TRAP BASED ON $\pi/2$ SEGMENTED CYLINDER
AND PHOTONIC HOOK IN AN INHOMOGENEOUS
(GRADIENT) MEDIUM**

The report proposes a new type of optical tweezer in a standing wave field based on a segmented cylinder and a new method for the formation of a photonic hook based on a homogeneous spherical or cylindrical particle placed in a gradient medium in the region of its shadow surface.

На сегодня известно несколько подходов к формированию ближнепольных локализованных изогнутых световых пучков типа фотонный крючок [1 - 4]. Среди них [5]: несимметрия формы частицы при постоянном показателе преломления [3 - 7], симметричная частица с несимметрией показателя преломления [8], симметричная однородная частица с ассиметрией облучающей волны [9, 10], использование системы мезоразмерных рассеивателей [11], а также симметричные частицы, расположенные в неоднородной (например, с дискретным распределением показателя преломления) среде, и комбинация этих методов. На рис. 1 показаны конфигурации поля для новых, ранее не известных конфигураций – оптической ловушки на основе цилиндрической частицы с $\pi/2$ -вырезанным сегментом и однородной сферы в среде с градиентным (ступенчатым) показателем преломления в теневой части частицы.

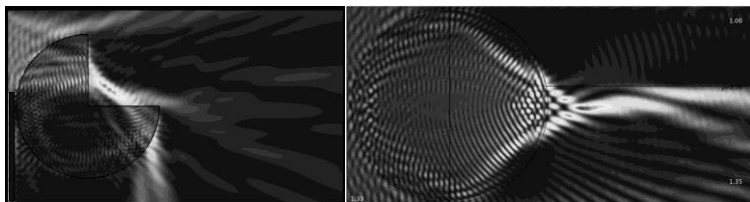


Рис. 1. Пример структурированных субволновых полей: оптическая ловушка в поле стоячей волны на основе $\pi/2$ сегментированного цилиндра и формирование фотонного крючка в неоднородной среде

Концепция фотонного крючка предлагает изысканный контроль над движением частицы для манипулирования и сортировки клеток на платформах «лаборатория-на-чипе», для *in vitro* применений – направлять клетки по изогнутой траектории для последующей их дифференциации [12, 13], а также для транспорта нанообъектов в межклеточной или внутриклеточной среде по искривленной траектории, для доставки нанолечарств через барьеры центральной нервной системы, лазерной хирургии [14], наноструктурирования поверхностей, новых фотонных устройствах [15] и других областях.

References

1. Minin I.V., Minin O.V. Patent of Russia № 161207. 27.10.2015.
2. Minin I.V., Minin O.V. // J of Biomedical Photonics & Eng. 2020. V. 6(2). P. 020301.
3. Yue L., et al. // Optics Letters. 2018. V. 43(4). P. 771.
4. Spector M., et al. // Nanoscale Advances. 2020. V. 2(6). P. 2595.
5. Minin O.V., Minin I.V. The Photonic Hook: From Optics to Acoustics and Plasmonics. Springer, Cham, 2021.
6. Minin I.V., et al. // APL. 2019. V. 114(3). P. 031105.
7. Spector M., et al. // Nanoscale Advances. 2020. V. 2. P. 5312.
8. Geints Y.E., et al. // J Opt. 2020. V. 22. P. 065606.
9. Minin I.V., et al. // Optics Letters. 2020. V. 45. No. 17. P. 4899.
10. Liu C.-Y., et al. // Journal of optics. 2020. V. 22(8). P. 085002.
11. Pacheco-Peña V., et al. // Sci Rep. 2021. V. 11. P. 20278.
12. Ang A., et al. // Sci Rep. 2018. V. 8. P. 2029.
13. Ang A., et al. // Proc. META 2018, the 9th Int. Conf. on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics. France, 2018.
14. Minin I.V., et al. // J Biophotonics. 2021. V. 14(2). P. e202000342.
15. Geints Y.E., et al. // Ann. Phys. (Berlin). 2021. V. 533(9). P. 2100192.

Н.И. ПЕТРОВ

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

ДЕПОЛЯРИЗАЦИЯ ВИХРЕВЫХ ПУЧКОВ СВЕТА ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Исследована непараксиальная эволюция векторных волновых пучков света в свободном пространстве. Показано, что значительное уменьшение степени поляризации излучения происходит на расстояниях порядка дифракционной длины.

N.I. PETROV

Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow

DEPOLARIZATION OF VORTEX LIGHT BEAMS ON PROPAGATION IN FREE SPACE

The non-paraxial evolution of vector wave beams of light in free space is investigated. It is shown that a significant decrease in the degree of polarization of radiation occurs at distances of the order of the diffraction length.

Известно, что поляризация плоской волны остается постоянной при распространении в однородной, изотропной, и недисперсионной среде [1]. Однако структурированные световые пучки подвергаются деполяризации из-за дифракции и спин-орбитального взаимодействия. Деполяризация излучения в случайно неоднородных средах изучалась в [2]. В [3] было показано, что степень поляризации излучения в изотропном световоде с параболическим профилем показателя преломления уменьшается с расстоянием.

В настоящей работе исследовано изменение степени поляризации векторных пучков света при распространении в свободном пространстве. Показано, что степень поляризации уменьшается значительно на расстояниях порядка дифракционной длины и продолжает плавно падать на больших расстояниях от источника излучения.

Степень поляризации определяется из вычислений матрицы когерентности [1]:

$$P = \left(1 - \frac{4\det\Phi}{Sp^2\Phi}\right)^{1/2}, \text{ где } \Phi = \begin{pmatrix} \langle E_r^* E_r \rangle & \langle E_r^* E_\varphi \rangle \\ \langle E_\varphi^* E_r \rangle & \langle E_\varphi^* E_\varphi \rangle \end{pmatrix}.$$

Имеется тесная связь степени поляризации с параметром квантовой чистоты пучка света $\zeta = 1 - Sp(\rho^2)$, где ρ – матрица плотности, соответствующая нормированной функции когерентности Φ .

На рис. 1 показано изменение степени поляризации линейно-поляризованного гауссова пучка света с расстоянием для радиуса пучка $w_0 = 15 \mu\text{m}$. Из рис. 1 видно, что сильное изменение степени поляризации происходит на расстояниях порядка дифракционной длины $l_d = kw_0^2/2$. На рис. 2 представлена кривая зависимости параметра квантовой чистоты пучка от расстояния. Видно, что если в начальной плоскости пучок находится в чистом состоянии, то при распространении пучок переходит в смешанное состояние.

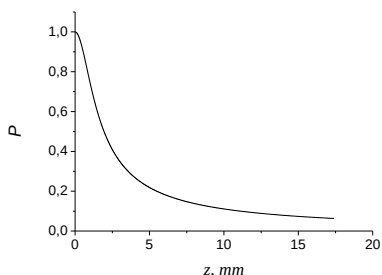


Рис. 1. Степень поляризации как функция от расстояния

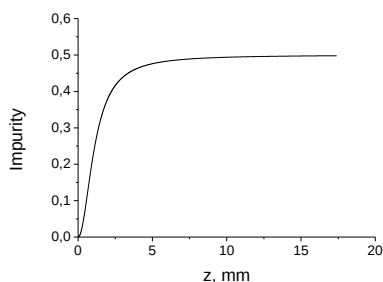


Рис. 2. Параметр квантовой чистоты пучка в зависимости от расстояния

Отметим, что для очень малых радиусов падающего пучка ($w_0 \ll \lambda$) двумерное описание поляризации является неполным. В [4, 5] было показано, что знание только векторной поляризации излучения недостаточно для полного определения поляризационного состояния сфокусированного пучка света. Следует учитывать дополнительные параметры (компоненты тензорной поляризации). Показано, что векторная и тензорная степени поляризации достаточны для полного описания трёхкомпонентного поля светового пучка.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-29-11026.

Список литературы

1. Wolf E. Introduction to the Theory of Coherence and Polarization of Light. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
2. Tatarskii V.I. // Izv. VUZov. Radiofizika. 1967. V. 10. P. 1762-1765.
3. Petrov N.I. // Fibers. 2021. V. 9(6). P. 34.
4. Petrov N.I. // Las. Phys. 2008. V. 18. P. 522-525.
5. Petrov N.I. // Phys. Rev. A. 2013. V. 88. P. 023815.

О.В. МИНИНА, Ю.Э. ГЕЙНЦ, А.А. ЗЕМЛЯНОВ
Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ МОЩНЫХ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ВОЗДУХЕ В УСЛОВИЯХ ВНЕШНЕЙ МОДУЛЯЦИИ ФАЗЫ ВОЛНЫ

В рамках решения задач дальнего распространения мощных фемтосекундных лазерных импульсов в атмосфере рассмотрены особенности самофокусировки и филаментации излучения, прошедшего через фазомодулирующий транспарант. Численное решение усреднённого по времени нелинейного уравнения Шредингера проводилось для различных начальных конфигураций транспаранта и начальной мощности излучения. В результате определены условия, для которых реализуется режим распространения излучения с квазипостоянным значением интенсивности на этапе постфиламентационного каналирования и угловой расходимостью высокоинтенсивного светового канала, которая не превосходит угловую расходимость канала, формируемого в случае, когда фазомодулирующий транспарант не используется.

O.V. MININA, Yu.E. GEINTS, A.A. ZEMLYANOV
V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk

NUMERICAL SIMULATIONS OF HIGH-POWER FEMTOSECOND LASER PULSE NONLINEAR PROPAGATION IN AIR UNDER APPLIED EXTERNAL WAVE-PHASE MODULATIONS

The dynamics of self-focusing and filamentation of ultrashort laser radiation with applied strong phase modulation by a phase plate is considered in the framework of the problem of long-range high-power femtosecond laser pulses propagation in the atmosphere. The numerical solution to the time-averaged nonlinear Schrödinger equation for the electrical wave amplitude is carried out for various configuration of the phase-shifting transparency and the initial power of laser radiation. During our simulations, we determine the conditions of pulse propagation in the regime with quasi-constant peak intensity at the post-filamentation channeling stage. In this regime, the angular divergence of the self-organized high-intensity light channels does not exceed the laser pulse divergence in the case when the phase-modulating transparency is not used.

Для решения задач нелинейной оптики атмосферы [1] важное значение имеет увеличение дистанции распространения мощных фемтосекундных лазерных импульсов и формирование упорядоченной структуры области филаментации. Одним из вариантов осуществления этого является использование фазомодулирующих транспарантов. В данной работе на основе численного решения усреднённого по времени нелинейного уравнения Шредингера (НУШ) проанализированы особенности распространения фемтосекундного импульса (несущая длина волны $\lambda_0 = 800$ нм, длительность импульса $t_b = 50$ фс) для различных конфигураций (рис. 1а) таких транспарантов. Основные соотношения, используемые при проведении моделирования, представлены в [2].

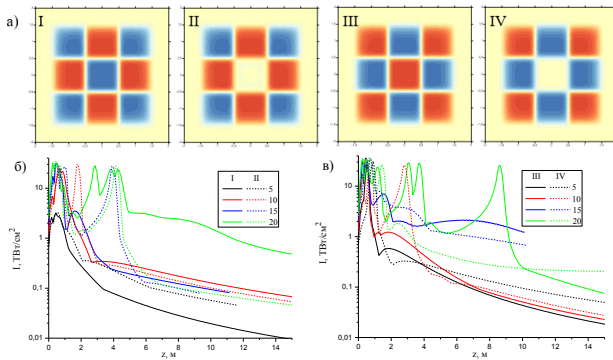


Рис. 1. Фазомодулирующие транспаранты с разностью фаз между соседними сегментами φ , равной $-\pi$ (I, II) и π (III, IV), в случаях, когда центр модулирован (I, III), и когда модуляции нет (II, IV) (а), пиковая интенсивность вдоль трассы распространения лазерного пучка радиусом $R_0 = 1$ мм и относительной мощностью η от 5 до 20 для транспаранта с $\varphi = -\pi$ (б) и π (в)

Рис. 1б и 1в демонстрируют, что создание структурированного излучения за счёт использования фазомодулирующих транспарантов способствует реализации постфиламентационного каналирования с квазипостоянным значением интенсивности (зелёная штриховая линия на рис. 1в), что важно для решения задач дальнего распространения мощных фемтосекундных лазерных импульсов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ № 21-12-00109.

Список литературы

1. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М. и др. Нелинейная фемтосекундная оптика атмосферы. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2010.
2. Geints Yu.E., Zemlyanov A.A. // Journal of Optics. 2021. V. 23 (10). P. 105502.

А.Д. РЕМЗОВ, М.В. САВЕЛЬЕВ

*Самарский национальный исследовательский университет
им. акад. С.П. Королева*

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧЕТЫРЁХВОЛНОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В ПРОЗРАЧНОЙ НАНОСУСПЕНЗИИ С УЧЁТОМ ПОЛЯ ТЯЖЕСТИ ЗЕМЛИ

Приведены результаты численного анализа пространственно-временных характеристик четырёхволнового преобразователя излучения в водной суспензии сферических наночастиц полистирола, находящихся в гравитационном поле.

A.D. REMZOV, M.V. SAVELYEV

Samara National Research University

SPATIAL AND TEMPORAL CHARACTERISTICS OF THE FOUR-WAVE RADIATION CONVERTER IN A TRANSPARENT NANOSUSPENSION TAKING INTO ACCOUNT THE EARTH'S GRAVITY FIELD

We present the results of a numerical analysis of the spatial and temporal characteristics of the four-wave radiation converter in an aqueous suspension of spherical polystyrene nanoparticles in a gravity field.

Активное применение коллоидных растворов наночастиц и наносуспензий в качестве основы для четырёхволновых преобразователей излучения в системах нелинейной адаптивной оптики требует знания точности соответствия пространственно-временных структур сигнальной и объектной волн. В таких средах энергия теплового движения молекул жидкости сравнима с энергией наночастиц в гравитационном поле Земли [1]. Учёт силы тяжести приводит к тому, что при стационарном режиме четырёхволнового взаимодействия (ЧВВ) в классической схеме со встречными волнами накачки, реализуемом в прозрачной наносуспензии, в модуле пространственного спектра объектной волны (ПСОВ) наблюдается нарушение аксиальной симметрии провала, возникающего вблизи нулевой пространственной частоты [2].

Целью работы является теоретическое исследование влияния гравитационного поля Земли на процесс формирования провала в модуле

ПСОВ, генерируемой в результате ЧВВ в прозрачной наносuspензии в классической схеме распространения волн накачки.

При выводе выражения, описывающего временную зависимость ПСОВ на передней грани плоского слоя наносuspензии, использовались приближения, представленные в работах [2 - 3].

В качестве нелинейной среды выбрана водная суспензия сферических наночастиц полистирола при температуре 20 °С, длина волны взаимодействующих волн 532 нм. На рис. 1 представлен модуль ПСОВ, нормированный на максимальное значение, в зависимости от пространственных частот χ_x и χ_y через 10^5 с после начала процесса ЧВВ в слое толщиной $\ell = 1$ мм. Радиус частиц a составлял 200 нм. Как и при стационарном ЧВВ [2], рост эффективной массы наночастиц приводит к уширению провала в модуле ПСОВ в направлении, коллинеарном направлению поля тяжести Земли.

Численный анализ временной зависимости ПСОВ показывает, что существует оптимальное время t_{opt} , в течение которого полуширина провала в модуле ПСОВ, определяемая вдоль направления χ_x , достигает минимального значения. Это время уменьшается с ростом радиуса a и, как следствие, эффективной массы наночастиц (рис. 2). С увеличением толщины слоя ℓ растет скорость изменения оптимального времени в зависимости от радиуса наночастиц.

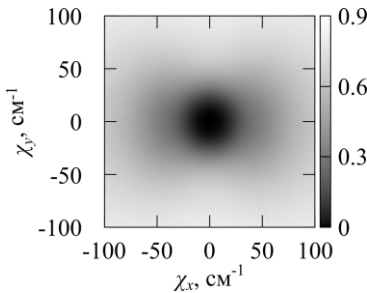


Рис. 1. Нормированный модуль ПСОВ

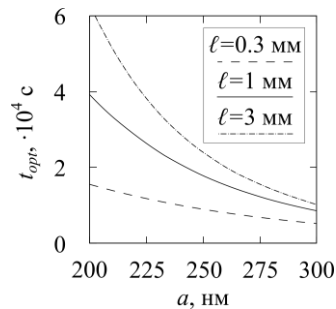


Рис. 2. Зависимость оптимального времени от радиуса наночастиц

Список литературы

1. Cherepanov I.N. // Tech. Phys. 2018. V. 63 (12). P. 1703.
2. Ремзов А.Д., Савельев М.В. // Известия РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 12. С. 1770.
3. Ивахник В.В., Савельев М.В. // Компьютерная оптика. 2018. Т. 42. № 2. С. 227.

Д.А. ПОЛЕТАЕВ, Б.В. СОКОЛЕНКО

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь

О ВОЗМОЖНОСТЯХ ПРИМЕНЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРАВИТАЦИОННЫХ ТУННЕЛЕЙ

Выдвигается гипотеза о возможности применения оптических вихрей для исследования гравитационных туннелей. Приводится описание особенностей применения и теоретическое обоснование предложенной методики.

D.A. POLETAEV, B.V. SOKOLENKO

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

THE POSSIBILITIES OF OPTICAL VORTEX'S APPLICATION TO GRAVITY TUNNELS' STUDY

In this paper a hypothesis about the possibility of using optical vortices for studying gravitational tunnels is put forward. The description of the features of the application and the theoretical substantiation of the proposed method are given.

Исследователи в области астрономии, используя современные методы оптической и радиочастотной телескопии, обнаружили интересные структуры – гравитационные тоннели в солнечной системе [1]. Численные модели коллег [1] показывают, что на данных образованиях присутствуют повышенные гравитационные поля, образующие гравитационные стенки. При этом скорость объектов, находящихся внутри туннелей, значительно возрастает.

Прямое экспериментальное исследование гравитационных туннелей затруднено [1]. Оптические методы, в которых используются интерферометрия и когерентные источники света, имеют много преимуществ [2 - 4]. К таким относятся оптические вихри, применяющие пучки Бесселя и Лагерра – Гаусса [2]. Представляется целесообразным предложить способ исследования протяжённых объектов оптическими вихрями, а также оценить возможности применения.

Целью работы является формулировка гипотезы о возможности исследования оптическими вихрями гравитационных туннелей и её оценка.

Частное решение параксиального волнового уравнения для вихревого пучка Лагерра – Гаусса записывается следующим образом [2]:

$$E_x = \frac{\omega_0}{w} \left(\frac{r}{w} \right)^{|l|} L_m^l \left(m, \frac{r^2}{w^2} \right) \cdot \exp \left(-\frac{r^2}{w^2} \right) \cdot \exp \left(-\frac{ikr^2}{2z(1+z_R^2/z^2)} \right) \times \exp(-il\varphi) \cdot \exp \left(i(2m+l-1) \arctan \left(\frac{z}{z_R} \right) \right) \cdot \exp(-ikz) \quad (1)$$

где $z_R = \frac{k\omega_0^2}{2}$ – длина Рэлея; w_0 – перетяжка пучка в рассматриваемой плоскости; $l = \pm 1, \pm 2, \dots$ – индекс топологического заряда; r – радиус пучка. По определению, условие существования вихря должно удовлетворять выражению:

$$\operatorname{Re} E_x(x=0, y=0, z) = \operatorname{Im} E_x(x=0, y=0, z) = 0. \quad (2)$$

При этом методика состоит в следующем. Тестовый источник формирует кодовую последовательность оптических вихрей с разными топологическими зарядами. Данная последовательность проходит по предполагаемому гравитационному тоннелю (при этом оптической вихрь удерживается внутри стенок тоннеля гравитационным полем). Ввиду высокой устойчивости оптического вихря, данная структура будет путешествовать по гравитационному тоннелю с сохранением заданных передатчиком соотношений топологических зарядов. Приёмник, принимая условную кодовую последовательность оптических вихрей в предварительно определённой по численной модели точке, и производит сопоставление отправленной и полученной последовательности. По проведённым оценкам, мощности лазера в 1 Вт достаточно для формирования оптического вихря для данного применения. Применяя изложенную методику, можно проводить исследование траекторий, их протяжённостей (по длительности задержки принимаемой кодовой последовательности оптических вихрей), особенностей и характеристик. Таким образом, можно осуществлять исследование и других астрономических объектов.

Из уравнения (1) следует, что размеры неоднородностей (с показателем преломления $n > 1$) должны быть много меньше радиуса пучка r , либо (в случае размеров больше r) полностью пропускать весь пучок для комплексного сдвига фаз всех компонент.

Список литературы

1. Todorović N., et al. // Sci. adv. 2020. V. 6.
2. Wickramasinghe H. // Acta materialia. 2000. V. 48. P. 347-358.
3. Vijayakumar A., et al. // Opt. Express. 2017. V. 25. P. 13883-13896.
4. Soskin M. // Progress in Optics. 2001. V. 42. P. 219-276.

А.В. ЛУКИН¹, А.Н. МЕЛЬНИКОВ¹, Н.К. ПАВЛЫЧЕВА²,
А.Н. ЧЕПЛАКОВ^{1,2}

¹АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики», Казань

²Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ

УСТРОЙСТВО ОБНАРУЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРА В УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ ДИАПАЗОНЕ

В работе представлен усовершенствованный вариант измерительного канала трёхдиапазонной оптической системы, который позволяет исследовать спектр в ультрафиолетовом диапазоне.

A.V. LUKIN¹, A.N. MELNIKOV¹, N.K. PAVLYCHEVA²,
A.N. CHEPLAKOV^{1,2}

¹Scientific and Production Association «State Institute of Applied Optics», Kazan

²Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI

ELECTRIC DISCHARGE DETECTION DEVICE WITH THE CAPABILITY OF RESEARCHING THE SPECTRUM IN THE ULTRAVIOLET RANGE

This paper presents an improved version of the measuring channel of the three-range optical system which makes it possible to research the spectrum in the ultraviolet range.

Наличие устройств обнаружения нарушения изоляции на линиях электропередач (ЛЭП) является необходимым для выявления предаварийных участков электросетей и предотвращения возникновения аварийных ситуаций из-за их обрыва. По имеющейся информации в открытых источниках в год на территории одной лишь Новосибирской области происходит в среднем 200 обрывов воздушных ЛЭП, что свидетельствует о необходимости своевременной диагностики их состояния.

В [1, 2] описано устройство обнаружения электрического разряда, которое имеет два канала: наблюдательный, предназначенный для работы в видимом и инфракрасном диапазонах спектра, и измерительный – в ультрафиолетовом диапазоне спектра (УФС). В качестве приёмника УФС

предлагалось использовать фотодиод для регистрации излучения в диапазоне 260 - 290 нм.

Проведённое исследование спектра электрического разряда [3] показало, что в нём имеются характерные линии в области 320 - 380 нм, обнаружение которых позволит более точно идентифицировать электрический разряд, возникающий при износе изоляции ЛЭП.

Для идентификации характерных линий предлагается использовать многоканальный матричный фотоприёмник модели S9037 производства компании «Hamamatsu» с размером пикселей 24 x 24 мкм и их числом 512 x 4, который имеет широкий рабочий спектральный диапазон от 200 до 1200 нм и приёмную площадку размером 12,288 x 0,096 мм [4].

Ранее для выделения излучения в УФС применялась пропускающая плоская голограммная дифракционная решётка, нанесённая на подложку из флюорита CaF_2 [5], вносящая значительные aberrации, поэтому она при расчёте была заменена на пропускающую вогнутую голограммную дифракционную решётку, что позволило уменьшить aberrации.

Пропускающая вогнутая голограммная дифракционная решётка была рассчитана по методике [6]. Моделирование в программе «Zemax» показало, что получено расчётное значение спектрального разрешения 13,1 нм/мм в плоскости изображения для спектрального диапазона 250 - 410 нм.

Таким образом, предложенный вариант устройства позволит исследовать спектр и открывает возможность более достоверно идентифицировать электрический разряд.

Список литературы

1. Лукин А.В., Мельников А.Н., Павлычева Н.К., Чеплаков А.Н. Трёхдиапазонная оптическая система для устройства обнаружения электрического разряда высоковольтного оборудования // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2021. № 1. С. 109-117.
2. Лукин А.В., Мельников А.Н., Чеплаков А.Н. Зеркальный объектив для переносного устройства обнаружения и измерения электрического разряда в высоковольтном промышленном оборудовании и электрических сетях // HOLOEXPO 2021: XVIII Междунар. конф. по голографии и прикладным оптическим технологиям: Тезисы докладов / МГТУ им. Н.Э. Баумана. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. С. 219-222.
3. Козырев А.В., Кожевников В.Ю., Костыря И.Д., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В. Излучение диффузного коронного разряда в воздухе атмосферного давления // Оптика атмосферы и океана. 2011. № 11. С. 1009-1017.
4. <https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/type/S9037-0902/index.html>.
5. Кристаллы фтористого кальция оптические. ОСТ 3-6304-87.
6. Павлычева Н.К., Муслимов Э.Р. Спектрограф с плоским полем на основе вогнутой пропускающей голограммной дифракционной решётки // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2010. № 4. С. 61-66.

Д.Г. ДЕНИСОВ, В.Е. КАРАСИК

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

АНАЛИЗ КОГЕРЕНТНЫХ СВОЙСТВ ИСТОЧНИКОВ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ОПТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Проанализированы результаты теоретических исследований, посвящённых изучению когерентных свойств источников оптического излучения. Рассмотрены понятия временной и пространственной когерентности квазимонохроматического источника излучения, а так же 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 (электромагнитного поля).

D.G. DENISOV, V.E. KARASSIK

Bauman Moscow State Technical University

THE ANALYSIS OF COHERENT PROPERTIES OF OPTICAL RADIATION SOURCES USED IN OPTICAL TECHNOLOGIES

The results of theoretical studies devoted to the study of the coherent properties of optical radiation sources are analyzed. The concepts of temporal and spatial coherence of a quasi-monochromatic radiation source, as well as the concept of the area and volume of a quantum-mechanical cell in a certain region of space for a certain source of optical radiation are considered. For the analyzed volume of coherence, the average number of photons in a certain spin state is considered, which determines the degeneracy parameter of laser radiation (electromagnetic field) in quantum statistics.

Как известно все источники оптического излучения характеризуются не только определёнными пространственно-угловыми характеристиками, но спектральными и когерентными свойствами [1, 2] (рис. 1). 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). 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.

В объёме представленной квантово-механической ячейки содержание среднего числа фотонов в определённом спиновом состоянии определяет параметр вырождения. На языке квантовой статистики параметр вырождения представляет собой среднее число фотонов, находящихся в одинаковом квантовом состоянии [2]. Дальнейшие теоретические исследования дают основания предполагать о том, что именно параметр вырождения является первичным в определении когерентных свойств оптического и в частности лазерного излучения с точки зрения количества содержания фотонов в анализируемой квантово-механической ячейке. Важно отметить, что параметр вырождения определяющим образом будет влиять на пространственную когерентность лазерного излучения при его взаимодействии с объектом (предметом), имеющим неоднородный профиль поверхности, а значить определять условия формирования пространственной спекл-структуры. Последняя, в свою очередь в значительной степени влияет как на распределение интенсивности среднего значения, так и на контраст регистрируемого видеоизображения в оптико-электронных приборах контроля параметров качества оптических изделий.

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.

Л.С. МАШКОВЦЕВА^{1,3}, Д.В. БОЛОТОВ¹, С.Ю. КАЗАНЦЕВ^{1,2},
П.Р. ТЕШАЕВ¹, Ж. РАБЕНАНДРАСАНА¹

¹Московский технический университет связи и информатики

²Московский политехнический университет

³Всероссийский институт научной и технической информации РАН, Москва

ИСТОЧНИКИ ОДИНОЧНЫХ ФОТОНОВ ДЛЯ СИСТЕМ СВЯЗИ С КВАНТОВЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ КЛЮЧЕЙ

Проведён анализ наиболее перспективных разработок в области создания источников одиночных фотонов для систем связи с квантовым распределением ключей. На основе инструментов анализа наукометрической базы данных SCOPUS выявлены наиболее перспективные платформы для источников одиночных фотонов, определены точки роста данных технологий и организации, осуществляющие финансирование этих работ.

L.S. MASHKOVTSOVA^{1,3}, D.V. BOLOTOV¹, S.Yu. KAZANTSEV^{1,2},
P.R. TESHAEV¹, J. RABENANDRASANA¹

¹Moscow Technical University of Communications and Informatics

²Moscow Polytechnic University

³All-Russian Institute for Scientific and Technical Information of the RAS, Moscow

SINGLE-PHOTON SOURCES FOR COMMUNICATION SYSTEMS WITH QUANTUM KEY DISTRIBUTION

The analysis of the most promising developments in the field of creating single-photon sources for communication systems with quantum key distribution is carried out. Based on the analysis tools of the SCOPUS scientometric database, the most promising single photon sources platforms have been identified. Development directions of these technologies and the organizations financing these works have been determined.

В настоящее время в области телекоммуникаций большое внимание уделяется исследованию и внедрению квантовых технологий [1]. При этом технология квантового распределения криптографических ключей (КРК), является наиболее зрелым и коммерчески продвинутым приложением квантовых технологий связи [1, 2]. При реализации большинства схем КРК основными элементами являются источники одиночных фотонов (ИОФ) и детекторы одиночных фотонов (ДОФ) [2, 3]. Известно, что для выполнения протоколов КРК необходимо использование одиночных фотонов [2]. Поэтому для широкого развития систем с КРК актуальным является создание надёжных ИОФ. В данной работе представлен анализ

информации, публикуемой по ИОФ в научно-технических изданиях, выявление наиболее перспективных платформ ИОФ и оценка уровня зрелости технологии для применения в системах связи с КРК.

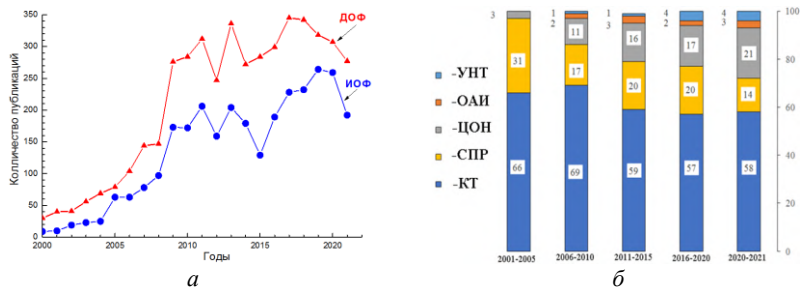


Рис. 1. Динамика публикаций в рецензируемых изданиях по тематике ДОФ и ИОФ (а); динамика изменения процентного соотношения публикаций по платформам, которые применялись для создания ИОФ в разное время (б)

На рис. 1а показана динамика публикационной активности по тематике ИОФ и ДОФ за 2000-2021 годы. Были проанализированы общие тенденции по выдаче патентов и распределение публикаций по ключевым словам. Определены организации и научные группы, которые на пятилетних временных интервалах отличались самой высокой публикационной активностью. Исследование выявило самые перспективные платформы для ИОФ: на квантовых точках (КТ), на спонтанном параметрическом распаде (СПР), на центрах окраски в нанокристаллах (ЦОН), на углеродных нанотрубках (УНТ) и на одиночных атомах и ионах (ОАИ). Динамика изменения интереса к этим платформам представлена на рис. 1б Установлено, что для задач КРК наиболее проработаны и исследованы ИОФ на КТ и нелинейных эффектах в кристаллах, однако наибольшую перспективность демонстрируют платформы ИОФ на УНТ и ЦОН. Установлено, что в настоящее время, тематика ИОФ пользуется повышенным вниманием: идёт активное финансирование прикладных разработок, а также наблюдается взрывной рост выдачи патентов в данной области.

Список литературы

1. Martin V., Brito J.P., et al. Quantum technologies in the telecommunications industry // EPJ Quantum Technology. 2021. V. 8. No. 1. P. 19.
2. Быковский А.Ю., Компанец И.Н. Квантовая криптография и комбинированные схемы коммуникационных сетей на её основе // Квантовая электроника. 2018. Т. 48. № 9. С. 777-801.
3. Eisaman M.D., Fan J., Migdall A., Polyakov S.V. Single-photon sources and detectors // Review of scientific instruments. 2011. V. 82. No. 7. P. 071101.

Д.Д. ПЛАТОНОВ, А.В. БЕЛОВ, С. ХЫДЫРОВА,
Д.Д. ВАСИЛЬЕВ, К.М. МОИСЕЕВ

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

СРАВНЕНИЕ КВАНТОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОДНОФОТОННОГО ДЕТЕКТОРА К ПОЛЯРИЗАЦИИ ФОТОНА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ГЕОМЕТРИИ МЕАНДРА

Рассмотрена квантовая эффективность сверхпроводникового однофотонного детектора к поляризованному свету для типов чувствительного элемента: прямоугольный меандр, спираль, кривые Пеано, два повернутых на 90° друг относительно друга прямоугольных меандра; выявлена наименее чувствительная к поляризации геометрия.

D.D. PLATONOV, A.V. BELOV, S. HYDYROVA,
D.D. VASILEV, K.M. MOISEEV

Bauman Moscow State Technical University

COMPARISON OF THE SINGLE PHOTON DETECTOR QUANTUM EFFICIENCY TO PHOTON POLARIZATION DEPENDING ON THE MEANDER GEOMETRY

The quantum efficiency of a superconducting single-photon detector to polarized light is considered for the types of a sensitive element: rectangular meander, spiral, Peano curves, two rectangular meanders rotated at 90° to each other; and the most polarization-insensitive meander geometry is revealed.

Сверхпроводниковые однофотонные детекторы востребованы в квантовых вычислениях и квантовой криптографии [1, 2]. Основным параметром детектора является квантовая эффективность QE , которая различается в зависимости от типа поляризации излучения. Для применения в квантовой криптографии и квантовой оптике необходимы детекторы, чувствительные ко всем типам поляризации излучения [3]. Для повышения QE детектора к требуемым типам поляризации исследуют различные формы чувствительного элемента: прямоугольный меандр; спираль; кривые Пеано; два прямоугольных меандра, повернутых на 90° друг относительно друга (рис. 1).

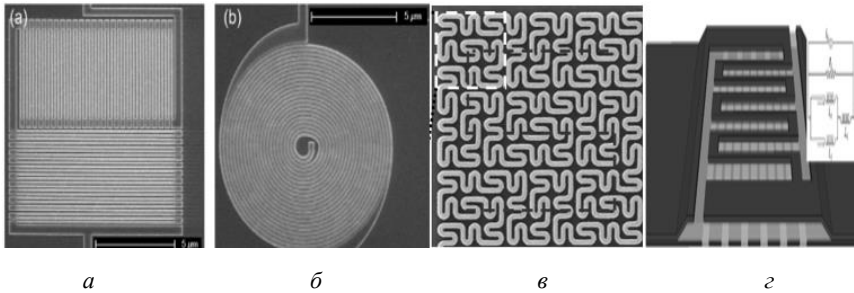


Рис. 1. Формы чувствительного элемента: прямоугольный меандр [4] (а); спираль [5] (б); кривые Пеано [6] (в); два прямоугольных меандра, повернутых на 90° друг относительно друга [3] (з)

Классическая форма чувствительного элемента (рис. 1а) в виде прямоугольного меандра имеет высокую квантовую эффективность к продольно поляризованному излучению и низкую к поперечно поляризованному, вследствие чего разность QE для поляризованного излучения составляет 10 % [4]. Для уменьшения разности между QE детектора к продольно и поперечно поляризованному излучению до 2 % используют спиральную форму чувствительного элемента (рис. 1б). Такая конструкция устраняет влияние поляризации только глобально, то есть при освещении всего детектора [5]. Поэтому используют чувствительные элементы в форме кривых Пеано (рис. 1в): детектор практически нечувствителен к линейной, круговой и естественной поляризации излучения, поэтому разность QE для поляризованного излучения составило 6 % при максимальной $QE = 67\%$ [6]; низкая максимальная QE обусловлена технологической сложностью изготовления данной формы чувствительного элемента. Альтернативным вариантом является расположение двух прямоугольных меандров, повернутых под углом 90° друг относительно друга и разграниченных слоем прозрачного диэлектрика (рис. 1з). Квантовая эффективность QE такой формы составила 85,6 %, а зависимость от поляризации менее 2 % [3].

Список литературы

1. Takesue H., et al. // Nature Photon. 2007. V. 1. № 6. P. 343-348.
2. Shibata H., et al. // Physics Procedia. 2012. V. 36. P. 324-329.
3. Verma V.B., et al. // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 101. № 25. P. 251114.
4. Xiao-Fang S., Xiao-Yan Y., Li-Xing Y. // Chinese Phys. Lett. 2010. V. 27. № 8. P. 087404.
5. Dorenbos S.N., et al. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93. № 16. P. 161102.
6. Chi X., et al. // Opt. Lett. 2018. V. 43. № 20. P. 5017.

А.П. ПЛЁНКИН, И.О. БРАГИН, Д.Н. ГОМОНОВ,
К.А. СТАТИВКА, А.А. ХОМУТОВ

Южный федеральный университет, Таганрог

ЕДИНАЯ СИСТЕМА ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ ДЛЯ ЦИФРОВОГО ГОРОДА

Приведено описание концепции цифрового города с точки зрения использования оптических каналов связи для различных объектов. Проведено моделирование квантового канала связи на основе автокомпенсационной системы квантового распределения ключей с фазовым кодированием состояний фотонов. Исследованы различные методы использования волоконно-оптических линии связи для передачи данных в едином информационном потоке. Проведён расчёт затуханий сигнала в оптическом канале связи и предложены меры по эффективному применению оборудования цифрового города для конкретных передающих сред.

A.P. PLJONKIN, I.O. BRAGIN, D.N. GOMONOV,
K.A. STATIVKA, A.A. HOMUTOV

Southern Federal University, Taganrog

UNIFIED OPTICAL COMMUNICATION SYSTEM FOR A DIGITAL CITY

The concept of a digital city is described from the point of view of using optical communication channels for various objects. A simulation of a quantum communication channel based on an auto compensation system of quantum key distribution with phase coding of photon states is carried out. Various methods of using fiber-optic communication lines for data transmission in a single information flow are investigated. The calculation of signal attenuation in the optical communication channel is carried out and measures for the effective use of digital city equipment for specific transmission media are proposed.

Единая система оптической связи включает в себя множество параметров, от передачи абонентской связи и видео контроля до передачи зашифрованной информации с помощью квантовых технологий [1].

Современная система цифрового города включает в себя множество различных сред передачи данных и не ограничивается одним стеком технологий. Защищённая система видеонаблюдения имеет важнейший вектор развития в реализации цифрового города. Данная система представляет собой множество IP-камер видеоконтроля, которые связаны

между собой оптоволоконным кабелем. Здесь же можно говорить о спектральном уплотнении каналов и протоколах шифрования IP-сервера. ВОЛС позволяет существенно увеличить расстояние между рассматриваемыми объектами в инфраструктуре цифрового города. Кроме того, в единую сеть относят и защищённые системы видеонаблюдения «Безопасный город-авто», которым необходимо иметь усиленные алгоритмы шифрования. Данные аспекты в видеонаблюдении являются основой всей реализации цифрового города, так как охватывают практически все объекты информационных систем. Эффективно спроектированная система обеспечивает всесторонний анализ статистических данных. Результаты моделирования показывают, что при использовании единой сети ВОЛС в масштабе цифрового города, эффективность анализа данных возрастает. При этом необходимо учитывать аспекты влияния внешних дестабилизирующих факторов на управляющие среды.

По стандартам максимальная длина медного кабеля FTP до потребителя без потери скорости составляет 100 метров. Оптические линии способны существенно увеличить это расстояние. Отметим, что при использовании системы квантовой связи (системы квантового распределения ключей), необходимо соблюдение условия единой линии, т.е. не допускается повторителей оптического сигнала. Известно, что оптоволоконные кабели более устойчивы к электромагнитным и радиочастотным помехам, а также устойчивы к поражению электрическим током. Рассматривая пассивную оптическую сеть (PON) в качестве составляющей цифрового города, можно говорить о смешанной конфигурации сети. Последнее позволяет использовать одну ВОЛС для различных пользователей и сегментов цифрового города. Дальность оптического кабеля в PON не должна превышать 20 км, в связи с этим было рассмотрено использование пассивной оптической сети в единой системе оптической связи для цифрового города в следующем виде. Когда основная волоконно-оптическая линия связи монтируется к узлу с абонентами, далее в работу включается PON, осуществляя разветвление оптоволоконна непосредственно по абонентам.

Работа выполнена при поддержке Института компьютерных технологий и информационной безопасности ЮФУ.

Список литературы

1. Pljonkin A., Petrov D., Sabantina L., Dakhkilgova K. Nonclassical attack on a quantum key distribution system // Entropy. 2021. V. 23. P. 509. <https://doi.org/10.3390/e23050509>.
2. Kumar A., Singh R., Mehra M. Study of passive network and gigabit passive optical network. <https://www.jetir.org/view?paper=JETIR1806608>.

А.П. ЛАВРОВ, С.И. ИВАНОВ, Д.В. КОНДАКОВ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ ЛИНИЯ ЗАДЕРЖКИ СВЧ СИГНАЛОВ РЕЦИРКУЛЯЦИОННОГО ТИПА

Приведены результаты экспериментального исследования макета оптической линии задержки (ЛЗ) СВЧ-сигналов рециркуляционного типа. Среда задержки – одномодовое волокно. Время задержки определяется длиной волоконного тракта и числом циклов рециркуляции. В петле рециркуляции осуществляется контроль коэффициента передачи ЛЗ – близким к 1, с предотвращением её перехода в режим автогенератора.

A.P. LAVROV, S.I. IVANOV, D.V. KONDAKOV

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

FIBER-OPTIC MICROWAVE SIGNAL DELAY LINE OF RECIRCULATING TYPE

Presents the result of experiments on laboratory setup of an optical delay line (DL) for microwave signals, the DL is recirculating type. The delay medium is a single-mode fiber. The delay time is determined by fiber length and recirculation cycles number. The recirculation loop gain is controlled closed to 1, with prevention the DL transition to autogenerator mode.

Линии задержки широкополосных СВЧ-сигналов широко применяются при реализации радиоэлектронных устройств различного назначения: для имитации отражённых сигналов в радарх, лидарах, для запоминания и последующего излучения радиосигналов в системах радиопротиводействия и многих других. Реализация ЛЗ на основе оптических технологий обеспечивает им сверхширокополосность – мгновенную полосу рабочих частот для СВЧ-сигналов до четырёх октав и более, например, 1..40 ГГц [1].

В данной работе исследуется регулируемая ЛЗ рециркуляционного типа [2]. В её основе лежит «обычная» аналоговая волоконно-оптическая ЛЗ (ВОЛЗ) типа IM-DD (intensity modulation – direct detection) [1]. В макете ВОЛЗ реализована с применением интегрально-оптического модулятора Маха - Цендера в передатчике (ПРД) и фотодетектора в приёмнике (ПРМ). Эта пара компонентов и обеспечивает сверхширокополосность ВОЛЗ. На входе и выходе ВОЛЗ установлены два

СВЧ-ключа типа «2 x 1». Этими ключами управляется СВЧ-ветвь «обратной» передачи сигнала с выхода ВОЛЗ вновь на её вход, то есть работа ЛЗ в рециркуляционном режиме. В этой ветви установлены СВЧ-усилитель и управляемый аттенюатор, их назначение – приблизить итоговый коэффициент передачи рециркуляционной ЛЗ к 1, поскольку «обычная» аналоговая ВОЛЗ имеет коэффициент передачи G_1 много меньше 1 [1]. Время задержки $T_{ЛЗ}$ в рециркуляционной ЛЗ кратно дискрету T_1 , который определяется длиной l_F волокна между ПРД и ПРМ. В макете использовались волокна с l_F 40 м и 112 м. Управление ключами выполняется с высокой точностью (≈ 2 нс) и согласовано с дискретом T_1 .

Нами исследована связь между максимальным числом рециркуляций NR_{MAX} , коэффициентом усиления G_R контура рециркуляции с учётом собственных шумов компонентов (как в самой ВОЛЗ, так и в ветви обратной связи). Пример работы ЛЗ с разными значениями G_R показан на рис. 1: сигнал на выходе ПРМ при замкнутой петле, $NR = 9$, $G_R = -2$ дБ (рис. 1а) и $G_R \approx 0$ дБ (рис. 1б). На входе ЛЗ радиоимпульс с длительностью $T_p = 548$ нс, время задержки $T_1 = 552$ нс, дискрет регулирования усиления в макете $\Delta G_R = 0,5$ дБ. При сохранении $G_R \approx 1$ увеличение числа рециркуляций приводит к переходу ЛЗ в режим автогенерации. Развитие собственных шумов в рециркуляционной ЛЗ показывает рис. 2. Для этой ЛЗ $NR_{MAX} = 20..22$, когда она превращается в автогенератор. Результаты исследования работы макета представлены также в [3].

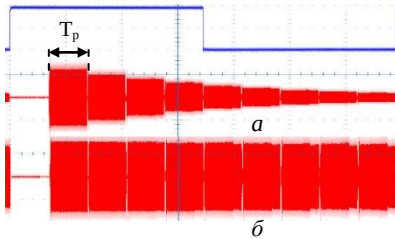


Рис. 1. Рециркуляция радиоимпульса в ЛЗ с числом рециркуляций $NR = 9$ при коэффициентах передачи $G_R = -2$ дБ (а) и $G_R \approx 0$ дБ (б)

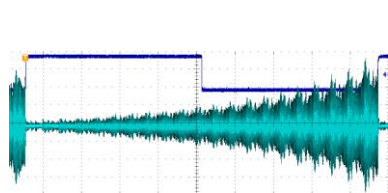


Рис. 2. Нарастание шума в рециркуляционной ЛЗ при коэффициенте передачи $G_R \approx 1$, число рециркуляций $NR = 19$

Список литературы

1. Урик В.Дж.-мл. и др. Основы микроволновой фотоники. 2016. М.: ТЕХНОСФЕРА.
2. Koffman I., Herczfeld P.R., et al. // Microw. Opt. Technol. Lett. 1988. V. 1(7). P. 232-235.
3. Kondakov D.V., et al. // Proc. of YETI-2021. Saint-Petersburg, 2021. Ch. 53.

В.А. НЕБАВСКИЙ, Р.С. СТАРИКОВ, Д.А. ТРЕТЬЯКОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

**О ВОЗМОЖНОСТЯХ АНАЛИЗА НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ
СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ АНАЛОГОВЫХ
ОПТИЧЕСКИХ ТРАКТОВ ПО ОПТИЧЕСКОМУ
И РАДИОЧАСТОТНОМУ СПЕКТРАМ**

Обсуждаются возможности характеристики линейных свойств радиوفотонных систем с помощью анализа оптического спектра посредством высокоразрешающего спектрометра.

V.A. NEBAVSKIY, R.S. STARIKOV, D.A. TRETYAKOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

**ON THE POSSIBILITIES OF ANALYSIS OF NONLINEARITIES
OF ULTRA-HIGH FREQUENCY ANALOGUE OPTICAL LINKS
USING OPTICAL AND RADIO-FREQUENCY SPECTRA**

The possibilities of characterizing the linear properties of microwave photonic systems by analyzing the optical spectrum using a high-resolution spectrometer are discussed.

Развитие технологий передачи информации с использованием волоконной оптики, совершенствование технологий производства лазеров, электрооптических модуляторов и фотоприёмников, позволило существенно повысить характеристики аналоговых оптических трактов (АОТ) [1, 2].

Измерение нелинейных спектральных составляющих оптического спектра, позволяет не только получить больше информации о оптических трактах, но и получать динамические нелинейные характеристики на отдельных участках, исключая влияния отдельных элементов, таких как фотодиод на конце линии. Данные процедуры стали возможны благодаря изобретению новых спектрометров с разрешением в стандартном С-диапазоне до десятков мегагерц. Для этого были собраны две схемы измерения (рис. 1) Для анализа спектра использовался бриллюэновский анализатор спектра высокого разрешения BOSA 400 с разрешением порядка 0.08 пм с динамическим диапазоном более 80 дБ, а также анализатор спектра Rohde&Schwarz fsw 50.

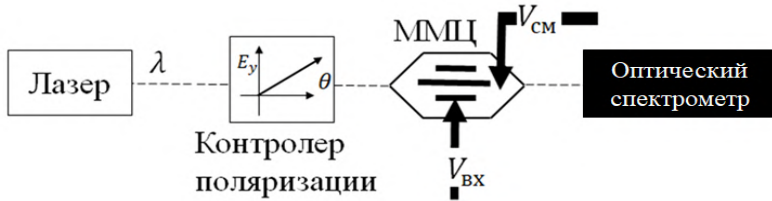


Рис. 1. Схема измерения оптического спектра, оптически модулированного сигнала: ММЦ – модулятор Маха-Цандера, V_{bx} – напряжение, подаваемое на модулятор, V_{cm} – напряжение смещения контролирующей рабочей точку

В зависимости от выбора рабочей точки, мы можем либо подавлять оптическую несущую, либо усиливать. Манипулируя разностью фаз между несущими сигналами, возможно либо подавлять нелинейности нечётных, либо чётных порядков электрического сигнала на фотодиоде (1).

$$I \sim \left| e^{j m \sin(\omega t) + \varphi_{cm}} + 1 \right|^2 = 2 + 2 \cos(m \sin(\omega t) + \varphi(V_{cm})) \quad (1)$$

Фактически нелинейные составляющие в спектре оптического поля, из-за изменения рабочей точки не меняются, однако, её изменения сильно сказываются на спектральной плотности электрического спектра на фотодиоде. Это объясняется тем, что частотное подавление имеет интерференционный характер. Изучая оптический спектр посредством корреляционного анализа, можно изучать нелинейные искажения без учёта влияния фотодиода [3, 4].

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) 20-37-90119.

Список литературы

1. Cox C. III Analog Optical Links. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
2. Urick V. Fundamentals of Microwave Photonics. Wiley, 2015.
3. Burla M., Hoessbacher C., Heni W., et al. A 325 GHz analog photonic link // International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP). Ottawa, 2019. P. 1-3.
4. Zhao F., Lu Y., Zhang L., Cai W., Wu S., Zhang Y. Linearized microwave photonic link based on dual-driven Mach-Zehnder modulator // Optical Engineering, 2020. V. 59. No. 01 P. 1.

В.А. КОКЛЮШКИН, И.А. ШЕВКУНОВ¹, А.В. БЕЛАШОВ²,
Ч.-Ж. ЧЕНГ³, Н.В. ПЕТРОВ

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

¹*Университет Тампере, Финляндия*

²*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург*

³*Тайваньский педагогический университет, Тайпей*

ИССЛЕДОВАНИЕ СИГНАЛА НЕКОЛЛИНЕАРНОЙ ВЫРОЖДЕННОЙ ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИИ В СХЕМЕ СО СФОКУСИРОВАННЫМ ПУЧКОМ НАКАЧКИ

Представлены результаты разработки и апробации метода осевой цифровой голографии для исследования нелинейных оптических свойств наноструктурированных объектов. В работе наблюдался сигнал неколлинеарной вырожденной фазовой модуляции, наведённой сфокусированной волной накачки в объекты с оптической нелинейностью керровского типа. Эксперименты проведены с лазером с длиной волны 1040 нм, длительностью импульса 200 фс и энергией импульса 14 нДж.

V.A. KOKLYUSHKIN, I.A. SHEVKUNOV¹, A.V. BELASHOV²,
C.-J. CHANG³, N.V. PETROV

ITMO University, Saint-Petersburg

¹*Tampere University, Tampere, Finland*

²*Ioffe Institute of the RAS, Saint-Petersburg*

³*National Taiwan Normal University, Taipei, Taiwan*

STUDY ON NONCOLLINEAR DEGENERATE PHASE MODULATION SIGNAL IN SCHEME WITH FOCUSED PUMP BEAM

We present the development and validation of in-line digital holography for studying of the nonlinear optical properties of nanostructured objects. In this work, we observed a signal of noncollinear degenerate phase modulation (NDPM) induced by a focused pump beam into objects with an optical nonlinearity of the Kerr type. The experiments were carried out with a femtosecond laser (200 fs) at a wavelength of 1040 nm, with a pulse energy of 14 nJ.

Ранее нами была предложена схема цифровой осевой голографии в схеме накачка-зондирование для исследования оптических нелинейных свойств образцов [1]. В рамках проведённой работы было предложено детектирование неоднородностей нелинейного показателя преломления в

прозрачных объектах благодаря анализу осевых цифровых голограмм, полученных в результате неколлинеарной вырожденной фазовой модуляции (НВФМ) зондирующего фемтосекундного импульса в исследуемом объекте. Для реализации этого метода необходимо обеспечить распространение двух фемтосекундных лазерных импульсов внутри исследуемого объекта, так чтобы один из этих импульсов обладал высокой пиковой плотностью мощности и приводил к локальному временному изменению показателя преломления среды (рис. 1). При этом зондирующий лазерный импульс, распространяющийся под углом к пучку накачки, дифрагирует на сформированном градиенте показателя преломления, что может быть использовано для анализа нелинейных свойств исследуемого объекта. В настоящей работе нами была апробирована схема со сфокусированной линзой Л в образец О волной накачки (рис. 1). Использовался фемтосекундная лазерная система ЛС на длине волны 1040 нм, энергией импульса 14 нДж.

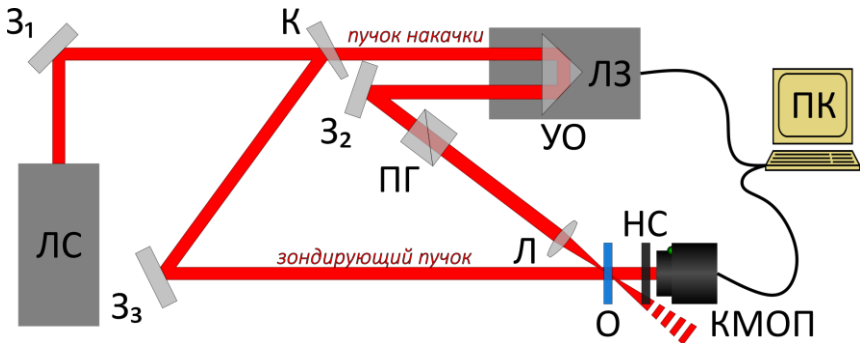


Рис. 1. Схема установки осевой цифровой голографии для детектирования неоднородностей нелинейного показателя преломления: ЛС – лазерная система, Z_1 , Z_2 , Z_3 – зеркала, К – оптический клин, ЛЗ – линия задержки, УО – уголковый отражатель, ПГ – призма Глана, Л – линза, О – образец, НС – набор нейтральных светофильтров, КМОП – камера, ПК – компьютер

Из зарегистрированных голограмм удалось извлечь дифрагированный сигнал НВФМ в виде концентрических колец. Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 19-52- 52018.

Список литературы

1. Belashov A.V., Cheng C.-J., Petrov N.V. Noncollinear degenerate phase modulation in samples with inhomogeneous optical nonlinear properties // Appl. Opt. 2021. V. 60(10). P. 14.

В.Г. СРЕДИН, Д.С. КОНРАДИ, М.В. САХАРОВ¹

Военная академия РВСН им. Петра Великого, Балашиха

¹12 ЦНИИ МО РФ, Сергиев Посад

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕПОЛЕВОЙ ЗАСВЕТКИ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ НА МАТРИЧНОЕ ФОТОПРИЁМНОЕ УСТРОЙСТВО

Обсуждается влияние внеполевой засветки лазерным излучением на функциональные характеристики фотоприёмных устройств на основе матричных фотоприёмников

V.G. SREDIN, D.S. KONRADI, M.V. SAKHAROV¹

Peter the Great Military Academy of the RVSN, Balashikha

*¹12 Central Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation,
Sergiev Posad*

MATHEMATICAL MODELING OF THE EFFECT OF OFF-AXIS ILLUMINATION BY LASER RADIATION ON A MATRIX PHOTODETECTOR

The influence of off-axis illumination by laser radiation on the functional characteristics of photodetectors based on matrix photodetectors is discussed.

В ряде работ рассматривался вопрос о влиянии лазерного излучения (ЛИ) на функционирование фотоприёмных устройств на основе матричных фотоприёмников (МФПУ) [1 - 4]. Основное внимание уделялось ситуации, когда источник ЛИ находился в поле зрения оптической системы МФПУ. В этом случае оптическая система фокусирует излучение на относительно небольшое число чувствительных элементов матрицы. В результате облучения их температура может повышаться вплоть до температуры плавления фоточувствительного материала, однако, как показано в [2] при этом оставшиеся элементы и вся матрица в целом не утрачивают своей работоспособности.

В том случае, когда источник ЛИ находится вне поля зрения оптической системы МФПУ, входной объектив последнего может быть засвечен рассеянным излучением, плотность мощности которого может быть относительно невелика, однако после прохождения через оптическую систему излучение фокусируется на относительно большее число чувствительных элементов матрицы, чем при фронтальном

освещении. В [3, 4] рассмотрено влияние внеполевой лазерной помехи на функциональные характеристики МФПУ систем наблюдения квазиточечных объектов. Показано, что в данной ситуации такие характеристики как вероятность ложной тревоги и пропуска цели могут аппроксимироваться функцией, зависящей от математического ожидания значения зарегистрированного сигнала помехи и параметра, связанного с распределением рассеянного ЛИ.

В настоящей работе предполагается, что засветка рассеянным ЛИ эквивалентна изменению облучённости чувствительных элементов матрицы, создаваемой фоном с определённой температурой и коэффициентом черноты. Это даёт возможность, варьируя эту величину имитировать изменение яркости фона, то есть имитировать внеосевую засветку. Для оценки параметров нами использовалась модель МФПУ, предложенная в [5]. Как показали наши расчёты, изменение яркостной температуры фона приводит к изменению уровня полезного сигнала, величины шумов и отношения сигнал/шум (рис. 1). Эта зависимость носит логарифмический характер. Аналогичным образом изменяется также удельная обнаружительная способность. При этом изображение, возникающее за счёт внеполевой засветки носит спеклованный характер и создаёт неравномерную облучённость чувствительных элементов, что при определённых условиях может привести к потере способности решения информационных задач с помощью МФПУ.

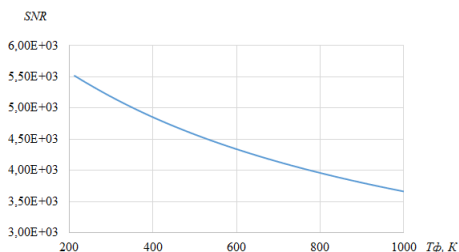


Рис. 1. График изменения яркостной температуры фона

Список литературы

1. Сахаров М.В., Средин В.Г., Аструаскас Й.И., Васильева Ю.В. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56. № 9-2. С. 98-101.
2. Стафеев В.И., Бурлаков И.Д., Болтарь К.О., Средин В.Г., Сахаров М.В., Суховой С.Б. // Известия высших учебных заведений. Матер. электронной техники. 2007. № 2. С. 31-34.
3. Павлов Н.И., Резунков Ю.А. // Квантовая электроника. 2020, Т. 50. № 12. С. 1160.
4. Павлов Н.И., Резунков Ю.А. // Оптический журнал. 2021. Т. 86, № 1. С. 37-43.
5. Патрашин А.И., Бурлаков И.Д., Корнеева М.Д., Шабаров В.В. // Прикладная физика. 2014. № 1. С. 38-46.

Н.Т. АВЛАСЕВИЧ, А.И. БУТЬ, А.М. ЛЯЛИКОВ

Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Беларусь

ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ С МАЛОЙ КЛИНОВИДНОСТЬЮ ПОДЛОЖЕК

Показана возможность повышения чувствительности измерений угла клина прозрачных пластин при формировании голографическим способом интерференционных картин. Повышение чувствительности достигается за счёт увеличения числа интерференционных полос в формируемых интерферограммах при оптической обработке пары голограмм клиновидной пластины.

N.T. AVLASEVICH, A.I. BUT, A.M. LYALIKOV

Janka Kupala Grodno State University, Belarus

INCREASING THE SENSITIVITY OF MEASURING CONTROL OF OPTICAL ELEMENTS WITH A SMALL WEDGE-SHAPED SUBSTRATE

The possibility of increasing the sensitivity of measurements of the angle of the wedge of transparent plates in the formation of holographic interference patterns is shown. An increase in sensitivity is achieved by increasing the number of interference fringes in the formed interferograms during optical processing of a pair of holograms of a wedge-shaped plate.

Сущность методики заключается в записи пары голограмм клиновидной пластины на отдельных носителях. Причём, на один носитель регистрируется голограмма клиновидной пластины, развернутая относительно нормали на угол 180° . Такой подход в записи голограмм позволяет за счёт последующей их оптической обработки повысить чувствительность измерений более чем на порядок по сравнению с двухлучевой интерферометрией с опорной волной, при этом исключить систематическую составляющую погрешностей за счёт полной компенсации аберраций.

Для реализации методики повышения чувствительности измерений угла клина прозрачной пластины используется любой голографический интерферометр, предназначенный для записи голограмм или интерферограмм с несущей частотой полос более 10 мм^{-1} [1]. Для обеспечения повышения чувствительности измерений угла клина запись

голограмм клиновидной пластины проводят в нелинейных условиях, обеспечивающих в дальнейшем восстановление волн в высших порядках дифракции [1, 2]. С этой целью использовалась оптическая схема устройства оптической обработки пары голограмм одним пучком света, позволяющая использовать как когерентное, так и некогерентное излучение [1, 3].

Предложенная методика повышения чувствительности измерений позволяет сформировать интерферограмму, для которой относительная погрешности $\delta\gamma/\gamma$ измерения угла клина менее 2 %. Максимальная чувствительность измерений при формировании интерферограмм по данной методике определяется максимальными порядками дифракции света на голограммах, используемыми для формирования интерференционной картины, при которых ещё возможно получение интерференционной картины удовлетворительного качества.

Для извлечения информации о величине угла клина может быть использован широкий спектр алгоритмов цифровой обработки одномерных интерферограмм.

Список литературы

1. Бекетова А.К., Белозеров А.Ф., Березкин А.Н. и др. Голографическая интерферометрия фазовых объектов. Л.: Наука, 1979.
2. Вест Ч. Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982.
3. Ляликов А.М. Высокочувствительная голографическая интерферометрия фазовых объектов. Гродно.: ГрГУ, 2010.

Д.Г. ДЕНИСОВ

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ПРОФИЛЯ НАНОМЕТРОВОГО УРОВНЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

В работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований высокоточного аттестационного контроля крупногабаритных плоских оптических деталей на основе алгоритмов регистрации и обработки результирующего значения средней интенсивности методом динамической интерферометрии. Предложена идея определения систематических погрешностей стендовой аппаратуры с целью количественной оценки значения спектральной плотности корреляционной функции в задаче высокоточного аттестационного контроля параметров профиля оптической детали в широком спектральном диапазоне поверхностных неоднородностей.

D.G. DENISOV

Bauman Moscow State Technical University

SPECTRAL ANALYSIS OF NANOMETER LEVEL PROFILE PARAMETERS OF LARGE-SIZED OPTICAL PARTS

The paper presents the results of theoretical and experimental studies of high-precision certification control of large-sized flat optical parts based on the algorithms for recording and processing the resulting value of the average intensity by the method of dynamic interferometry. The idea of determining the systematic errors of the bench equipment in order to quantify the value of the spectral density of the correlation function in the problem of high-precision certification control of the profile parameters of an optical part in a wide spectral range of surface irregularities is proposed.

Современные требования, предъявляемые к параметрам шероховатости поверхностей изделий астрономической и космической оптики, соответствующие сотым долям длины волны оптического контроля, определяют специфику методики производственного контроля [1, 2] (рис. 1). Представленная методика аттестации параметров волнового фронта (PV (Peak - to - Valley – максимальное расстояние между высотой наибольшего выступа и глубиной наибольшей впадины), RMS gradient (Root - Mean - Square gradient – среднеквадратическое отклонение значения градиента волнового фронта), и параметра профиля формы в

заданным частотных диапазонах, основана на расчёте и анализе одномерной спектральной плотности корреляционной функции (СПКФ1).

Критерием качества изготовления профилей поверхностей оптических деталей является двумерная функция PSD-2D (Power Spectral Density), однако, приведённая в стандарте ISO-10110 данная функция является одномерной – PSD - 1D. Требование к поверхности профиля детали по функции PSD - 1D в определённом диапазоне пространственных масштабов неоднородностей является определяющим критерием выбора контрольно-измерительной аппаратуры [2].

Для адекватной оценки измеряемых величин во втором частотном диапазоне ($33 - 2,5$) мм^{-1} необходимо отфильтровывать первый пространственно-частотный диапазон ($603 - 33$) мм^{-1} [2] поскольку вклад в погрешность измерения последнего является существенным. Это обусловлено в первую очередь низкими частотами неоднородностей контролируемых изделий, а так же систематической погрешностью средства измерения (рис. 1).

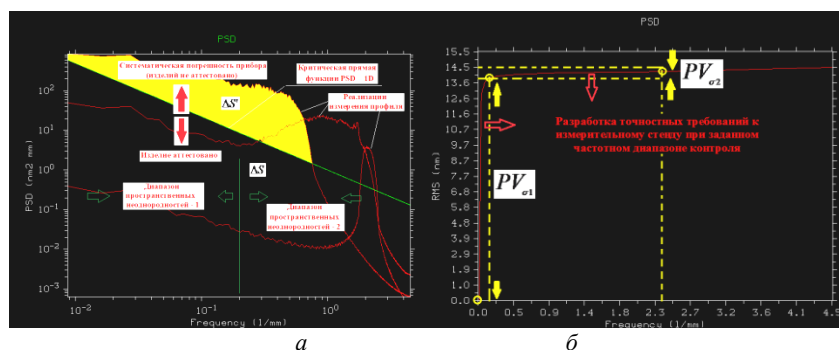


Рис. 1. К разработке методики аттестации поверхностных неоднородностей нанометрового уровня: график аттестации оптических изделий по данным построения одномерной функции PSD-1D (а); к определению систематической погрешности интерференционного стенда и качественных показателей профилей контролируемых изделий (б)

Список литературы:

1. Денисов Д.Г., Азарова В.В. Анализ погрешностей метода контроля параметров шероховатости субнанометрового уровня поверхностей оптических деталей на основе измерения рассеянного лазерного излучения // Контекст. 2020. Т. 19. № 1. С. 8-12.
2. Денисов Д.Г. Анализ погрешностей при цифровой обработке результатов интерферометрического контроля локальных отклонений нанометрового уровня поверхностей оптических деталей // Компьютерная оптика. 2017. Т. 41. № 6. С. 820-830.

В.Г. ВОЛКОВ, П.Д. ГИНДИН, В.В. КАРПОВ, С.А. КУЗНЕЦОВ
АО «Московский завод «САПФИР», Москва

ДНЕВНОЙ МОНОКУЛЯР С НОЧНЫМ КАНАЛОМ И С КАНАЛОМ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ДИАПАЗОНА

Рассматривается дневной монокуляр, содержащий дневной канал, ночной канал и канал ультрафиолетового (УФ) диапазона на базе электронно-оптических преобразователей (ЭОП).

V.G. VOLKOV, P.D. GINDIN, V.V. KARPOV, S.A. KUZNETSOV
JSC «Moscow plant «SAPHIR», Moscow

DAYTIME MONOCULAR CONTAINING A NIGHT CHANNEL AND AN ULTRAVIOLET CHANNEL

A daytime monocular containing a day channel, a night channel and an ultraviolet channel based on image intensifier is considered.

В настоящее время широкое распространение получили приборы наблюдения, в частности, монокуляры [1]. Дневной монокуляр не может работать ночью, а ночной – днем и визуализировать коронные разряды, возникающие в высоковольтных линиях электропередач (ЛЭП), в УФ-области спектра. Поэтому предлагается новый ночной монокуляр. Его блок-схема дана на рис. 1, а внешний вид – на рис. 2.

Дневной свет приходит в дневной объектив 2 монокуляра 1, проходит в области спектра 0,38 - 0,78 мкм через дихроичное плоское зеркало 3 и создаёт изображение в плоскости сетки 4. В призме Пехана 5 оно становится прямым и передаётся в первый окуляр 6.

Для визуализации коронного разряда ЛЭП служит канал УФ-диапазона 7. УФ-излучение проходит через объектив 2, отражается в области спектра 0,25 - 0,35 мкм от зеркала 3, проходит через УФ-фильтр 8 для области спектра 0,25 - 0,35 мкм, выделяя в ней характерные спектральные зоны типичных коронных разрядов, создавая их изображение в фокусе объектива 2. Оно переносится с помощью первого плоского зеркала 9 и первой оптики переноса 10 (ее компонентов 11 и 12) на фотокатод первого ЭОП 13. Он преобразует изображение в видимое и усиливает его по яркости. Изображение коронного разряда наблюдается через второй окуляр 14. Оператор видит одновременно и объект, и фон, и коронный разряд. Излучение звезд и Луны отражается от объекта и фона,

приходит в ночной объектив 16 ночного канала 15. Объектив 16 создаёт изображение на фотокатode второго ЭОП 17 с помощью второй оптики переноса 18 (её компонентов 19 и 21), второго плоского зеркала 20 и отражающей поверхности зеркала 3 передаётся в плоскость сетки 4. Далее устройство работает так, как канал 1, и в этом случае оператор наблюдает как ночное изображение, так и изображение коронного разряда.

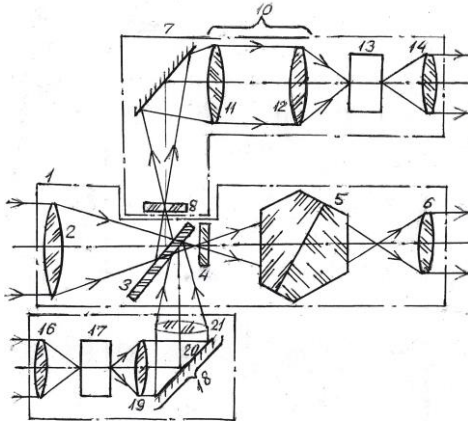


Рис. 1. Блок-схема монокуляра



Рис. 2. Внешний вид монокуляра

Список литературы

1. Гейхман И.Л., Волков В.Г. Видение и безопасность. М.: Новости, 2009.

Е.М. ЛЫСОВА

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

ЗЕРКАЛЬНЫЙ ТЕЛЕСКОП ДЛЯ КУБСАТ

В работе представлена оптическая система компактного двухзеркального телескопа для дистанционного зондирования Земли.

Е.М. LYSOVA

Bauman Moscow State Technical University

A REFLECTING TELESCOPE FOR CUBESAT

Optical system of a compact two-mirror telescope for remote sensing of the Earth is supported.

Телескоп для исследования космоса состоит из множества частей, но система визуализации является наиболее важным компонентом. Как правило, астрономические телескопы и аппараты, устанавливаемые на спутники, используют зеркальные системы. У этого аспекта есть несколько причин. Линзовая оптика обладает существенной хроматической аберрацией в отличие от зеркальной. Поверхность зеркала можно сделать очень точно, а также, так как при отражении не используется толщина материала, то можно использовать материал, устойчивый к космической радиации.

Целью работы было смоделировать оптическую систему небольшого двухзеркального телескопа, который подходил бы под размеры CubeSat. CubeSat – это формат сверхмалых искусственных спутников Земли для исследования космоса, имеющих габариты 10 x 10 x 10 см и массу не более 1,33 кг. При этом системы длиннее также удовлетворяют требованиям, если два измерения 10 x 10 см, а третье кратно 10 см. В моей работе размер спутника 10 x 10 x 30 см. Как правило, CubeSat выводятся по несколько единиц с помощью ракет-носителей или с борта пилотируемых и автоматических грузовых космических кораблей и орбитальных станций. Данная отрасль активно развивается из-за существенно меньшей цены выведения спутника.

Основная цель – это получение высококачественного изображения поверхности Земли. Система состоит из двух зеркал, размеры главного зеркала 8 x 8 см, второго – 4,9 x 2,2 мм. Размеры зеркал обосновываются размерами корпуса. Также у системы должно быть сравнительно короткое

фокусное расстояние. Идея и основная концепция разработаны на основе [1]. Расчёты конструктивных параметров проведены при помощи [2, 3].

В данной работе была использована система Ричи-Кретьена, она обладает наибольшим угловым полем зрения среди аналогичных систем. Компоновка системы показана на рис. 1, диаграммы рассеяния приведены на рис. 2.

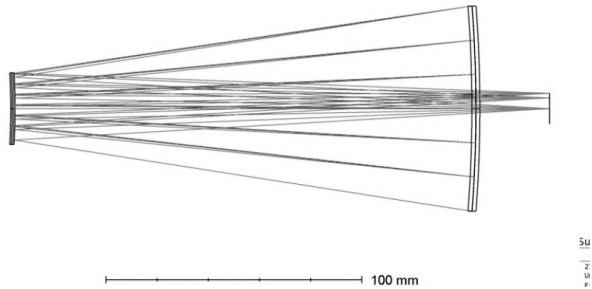


Рис. 1. Компоновка системы

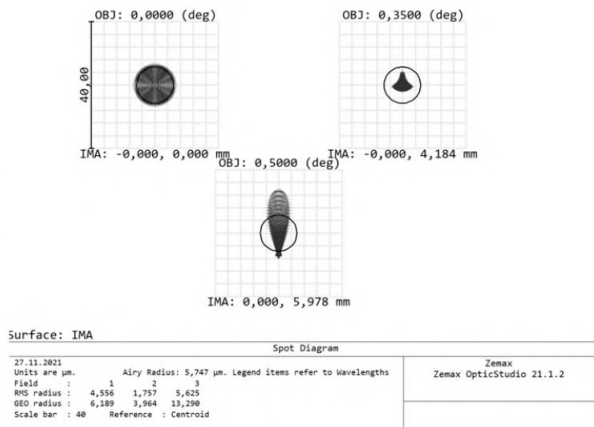


Рис. 2. Диаграммы рассеяния

Список литературы

1. Jin H., Lim J., Kim Y., Kim S. Optical design of a reflecting telescope for CubeSat // Journal of the Optical Society of Korea. 2013. V. 17. No. 6. P. 533-537/
2. Михельсон Н.Н. Оптические телескопы. Теория и конструкция. М.: Наука, 1976. С. 216-242.
3. Михельсон Н.Н. Оптика астрономических телескопов и методы её расчёта. М.: Физматлит, 1995. С. 236-240.

В.Г. ВОЛКОВ, П.Д. ГИНДИН, В.В. КАРПОВ, С.А. КУЗНЕЦОВ
АО «Московский завод «САПФИР», Москва

ПРИЦЕЛ ДЛЯ ОХОТНИЧЬЕГО СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ

Рассматривается охотничий прицел, обеспечивающий работу днем и ночью с возможностью оперативного ввода в поле зрения служебной информации.

V.G. VOLKOV, P.D. GINDIN, V.V. KARPOV, S.A. KUZNETSOV
JSC «Moscow plant «SAPHIR», Moscow

SIGHT FOR HUNTING SMALL ARMS

We consider a hunting sight that provides day and night operation with the ability to quickly enter service information into the field of view.

В настоящее время широкое распространение приобрели охотничьи прицелы, например, модель ПО-3-9 x 24 фирмы ПО ФГУП НПЗ [1]. Недостаток прицела – невозможность работы ночью и введения в поле зрения прицела полезной служебной информации. От этих недостатков свободен охотничий прицел [2]. Его блок-схема дана на рис. 1, а внешний вид приведён на рис. 2.

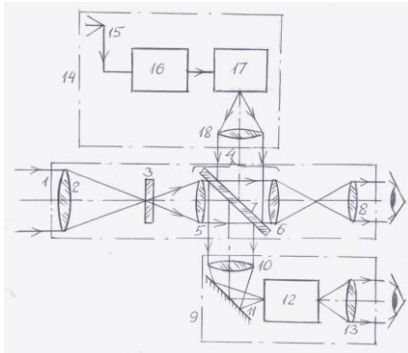


Рис. 1. Блок-схема прицела



Рис. 2. Внешний вид прицела

Днём работает дневной канал 1. Его объектив 2 создаёт перевернутое изображение цели и фона в плоскости сетки. Панкратическая линзовая оборачивающая система 4 делает изображение прямым с помощью первого компонента 5, второго компонента 6 и дихроичного плоского зеркала 4 и вводит в первый окуляр. При перемещении первого 5 и второго 6 компонентов увеличение прицела меняется в зависимости от дальности до цели. Ночью объектив 2 создаёт изображение цели и фона в плоскости сетки 3, первый компонент 5 коллимирует излучение. Оно отражается от первого зеркала 7 и приходит в третий компонент 10 ночного канала 9. С помощью плоского зеркала 11 третий компонент 10 передаёт изображение на фотокатод ЭОП 12. Изображение с экрана ЭОП 12 наблюдается оператором через второй окуляр 13. При этом в процессе взаимного перемещения первого компонента 5 и третьего компонента 10 изменяется увеличение прицела в зависимости от дальности до цели. Для ввода служебной информации в поле зрения прицела служит электронный блок 14. Его штывревая антенна 15 принимает радиосигнал с информацией и передаёт его в радиоприёмное устройство 16. Видеосигнал с его выхода поступает в OLED дисплей 17. Полезная служебная информация с его экрана с помощью четвёртого компонента 18, зеркала 7 и второго компонента 6 передаётся в окуляр 8.

Список литературы

1. Дневные прицелы. Каталог ПО ФГУП НПЗ, РФ. Новосибирск, 2019.
2. Прицел для лёгкого стрелкового оружия. Патент на полезную модель № 199038 по заявке № 2020111541 с приоритетом от 20.03.2020.

О.В. ПЕЧИНСКАЯ, А.А. ПРОЗОРОВСКАЯ

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

МОДИФИКАЦИЯ ТЕЛЕОБЪЕКТИВА ПИРОМЕТРА СПЕКТРАЛЬНОГО ОТНОШЕНИЯ ПУТЁМ КОРРЕКЦИИ АБЕРРАЦИЙ

Приведены результаты синтеза телеобъектива пирометра спектрального отношения с помощью САПР Zemax. В ходе работы было получено несколько вариантов телеобъектива с коррекцией аберраций. Объектив предназначен для работы в составе приёмной оптической системы пирометра спектрального отношения.

O.V. PECHINSKAYA, A.A. PROZOROVSKAYA

National Research University "Moscow Power Engineering Institute"

MODIFICATION OF THE TELEPHOTO LENS OF A SPECTRAL RATIO PYROMETER BY CORRECTING ABERRATIONS

The results of synthesizing a telephoto lens of a spectral ratio pyrometer using CAD Zemax is presented. In the course of work were obtained several versions of a lens with aberration correction. The telephoto lens is designed to work as a part of the receiving optical system of a spectral ratio pyrometer.

Исходная приёмная оптическая система многоканального пирометра спектрального отношения является необходимой составной частью приёмной оптической системы пирометра [1], и на данный момент представляет из себя телеобъектив. Телеобъектив обладает фокусным расстоянием 100 мм и состоит из двух линз с фокусными расстояниями 50 мм и -50 мм. При анализе [2] исходного объектива пирометра было выявлено наличие сферической аберрации и аберрации хроматизма положения. Наличие данных аберраций ограничивает предельно достижимый кружок рассеяния, а также снижает долю энергии в кружке. Так как в макете пирометра используется оптоволокно с диаметром сердцевины 50 мкм, необходимо уменьшить кружок рассеяния до приемлемых размеров, а также поднять долю энергии в кружке, чтобы большая часть излучения попадала в волоконный световод.

Целью работы является повышение эффективности ввода излучения в оптоволокно, путём коррекции перечисленных аберраций. Объектив

рассчитан на работу в инфракрасном (ИК) диапазоне длин волн: 0,98, 1,35 и 1,48 мкм. В качестве основной длины волны принято значение 1,35 мкм. Предельно допустимый размер кружка рассеяния на длине волны 1,35 мкм составляет 8 мкм. Объектив является частью неизображающей оптической системы, поэтому нет необходимости приводить его параметры к дифракционному качеству. В качестве опорного значения служит доля энергии в кружке рассеяния радиусом 25 мкм, что соответствует размеру сердцевины волоконного световода.

В ходе работы были получены конструктивные параметры нескольких вариантов телеобъектива (приведены в табл. 1), обеспечивающих лучшие показатели, чем исходный. В том числе, подобраны пары стёкол, более подходящие для работы в указанном ИК-диапазоне. Также синтезированные объективы обладают приемлемым уровнем ахроматизации и уменьшенными кружками рассеяния. Значение доли энергии в кружке радиусом 25 мкм превосходит более чем в два раза долю энергии, даваемую исходным объективом.

Таблица 1. Полученные результаты для нескольких вариантов объектива

Тип объектива	Рабочие длины волн (0,98 мкм; 1,35 мкм; 1,48 мкм)			
	Оптическая длина объектива, мм	Фокусное расстояние, мм	СКЗ радиуса кружка рассеяния, мкм	Доля энергии в кружке, %
Двухлинзовый	71,10	93,24	112,63	15,65
Трёхлинзовый	89,48	79,82	55,23	27,07
Четырёхлинзовый	89,51	93,17	44,97	53,64

В дальнейшем планируется интегрировать разработанные объективы в модель оптической системы пирометра и проверить энергетические характеристики системы.

Список литературы

1. Поройков А.Ю., Фланден В.С., Лапицкий К.М. Томографическая система измерения локальных температур пламени с помощью пирометра спектрального отношения // ПТЭ. 2019. № 1. С. 110-116.
2. Запрягаева Л.А., Свешникова И.С. Расчёт и проектирование оптических систем: Учебник для вузов. М.: Логос, 2000.

Д.М. АХМЕТОВ, Э.Р. МУСЛИМОВ

*Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ***СПЕКТРОГРАФ С КОМПОЗИТНОЙ ГРИЗМОЙ**

Представлена схема изображающего спектрографа для видимого диапазона с гризмой, использующей четыре независимо оптимизируемых решётки. Показано, что данный элемент обладает высокой эффективностью и позволяет улучшить качество изображения до 40 %.

D.M. AKHMETOV, E.R. MUSLIMOV

*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI***SPECTROGRAPH WITH A COMPOSITE GRISM**

We present an optical design of imaging spectrograph for the visible domain, based on a grism, which uses four independently optimized gratings. It's shown that this element has a high efficiency and allows to improve the image quality by 40 %.

Сочетание дифракционной решётки и призмы (гризма), позволяет строить оптические схемы с нулевым отклонением и раздельно наблюдать спектры от различных точек щели. Подобные изображающие спектрографы находят применение в различных областях, в том числе в биомедицинских исследованиях [1]. При этом условия работы решётки в таком компоненте изменяются по её поверхности из-за дисперсии в призме и аберраций предшествующих элементов. В настоящей работе мы рассматриваем возможность компенсации данных эффектов за счёт использования композитной голограммы [2], то есть разбитой на несколько элементарных полей, в каждом из которых аберрационные свойства и свойства голографического слоя меняются независимо.

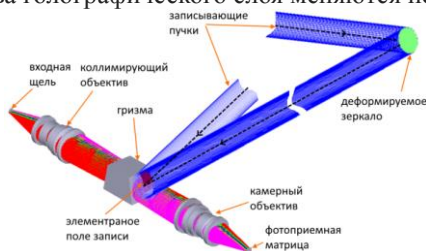


Рис. 1. Совмещённая схема записи и работы композитной гризмы

В качестве примера рассмотрена схема (рис. 1), работающая в диапазоне 400 - 675 нм с относительным отверстием 1:2,9. Схема использует серийные объективы Гелиос-44 (58 мм, 1:2), призму из стекла К8 с углом $10,1^\circ$ и пропускающую голограммную решётку 308 мм^{-1} . Решётка делится на четыре квадранта, и записывается двумя параллельными пучками от Аг-лазера (488 нм). В одном из пучков установлено вспомогательное деформируемое зеркало, форма поверхности которого оптимизируется раздельно для каждого квадранта. Спектрограф имеет линейное поле зрения 5 мм и обратную линейную дисперсию $51,6 \text{ нм/мм}$. Расчёты по формулам теории Когельника [3] показывают, что дифракционная эффективность по рабочему диапазону составляет 83,7 - 98,9 % при толщине слоя и глубине модуляции 0,04. Анализ качества изображения показал, что при деформации вспомогательного зеркала не более 2,5 мкм можно уменьшить среднеквадратический радиус пятен рассеяния с 16,2 - 20,6 до 9,7 - 16,7 мкм для центра и края поля зрения, соответственно (рис. 2).

Таким образом, обеспечено высокое пропускание оптического тракта и повышение показателей качества изображения до 40 %.

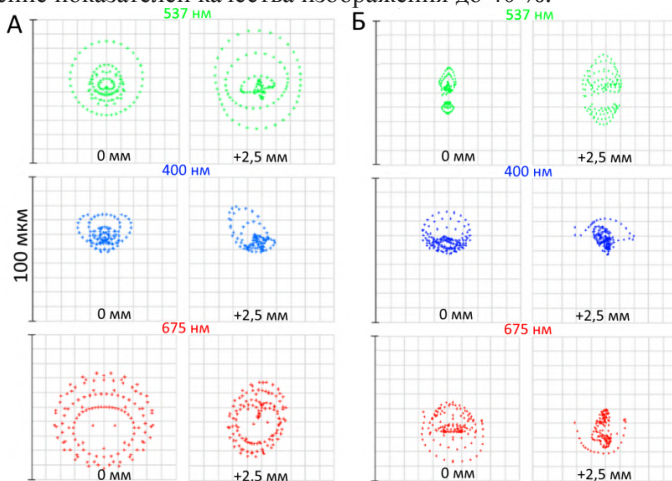


Рис. 2. Точечные диаграммы спектрографа: без коррекции (А), с деформируемым зеркалом (Б)

Список литературы

1. Lachance G.P., et. al. // 27th IEEE ICECS Proc. 2020. P. 1-4.
2. Muslimov E.R., et al.// Photonis Russia. 2020.V. 14(7). P. 586.
3. Kogelnik H.// Bell Syst. Tech. J. 1969. V. 48. P. 2909-2947.

В.И. БУСУРИН, Н.А. МАКАРЕНКОВА, К.А. КОРОБКОВ,
Р.П. БУЛЫЧЁВ

*Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)*

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕЦИЗИОННОГО ГРАВИМЕТРА С ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ ОПТИЧЕСКИМ СЧИТЫВАНИЕМ

Разработаны структурная и функциональная схемы прецизионного гравиметра с дифференциальным оптическим считыванием. Выполнены численный эксперимент и полунатурное исследование оптического считывающего узла. Проведён анализ характеристик на основе разработанной имитационной модели.

V.I. BUSURIN, N.A. MAKARENKOVA, K.A. KOROBKOV,
R.P. BULYCHEV

Moscow Aviation Institute (National Research University)

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF PRECISION GRAVIMETER WITH DIFFERENTIAL OPTICAL READING

Structural and functional diagrams of precision gravimeter with differential optical readout have been developed. A numerical experiment and seminatural study of optical reading unit have been carried out. The analysis of characteristics is carried out on the basis of the developed simulation model.

К актуальным требованиям современных систем управления относится использование в контуре измерений преобразователей, обеспечивающих высокую точность. К таким преобразователям относятся и гравиметры, измеряющие локальное значение силы тяжести. Актуальность подтверждается необходимостью получения информации о гравитационном поле Земли в широком спектре прикладных задач, связанных, например, с авиацией, проведением георазведки, прогнозом землетрясений и т.д. Одной из проблем данной области является недостаточная точность современных авиационных гравиметров, необходимых для коррекции систем инерциальной навигации.

Путём улучшения точностных характеристик гравиметров может быть интеграция современных оптических модулей, воспринимающих информацию о силе тяжести с высокой точностью, в классические измерительные схемы. Использование высокочувствительных оптических

средств считывания, например, на основе оптического туннельного эффекта (ОТЭ), всё чаще встречается в преобразователях угловых скоростей и линейных ускорений [1, 2].

Предложен прецизионный гравиметр на основе ОТЭ, использующий дифференциальную схему включения узлов считывания. Информация о силе притяжения детектируется за счёт перемещений эталонной массы, которая через механический делитель соединена с воспринимающими элементами (ВЭ) оптических считывающих узлов. Оптический считывающий узел включает в себя ВЭ мембранного типа, который через кольцевую втулку закреплён на гипотенузной грани призмы полного внутреннего отражения. В одну катетную грань призмы вводится коллимированное инфракрасное излучение под углом, близким к критическому, но не превышающим его. Через гипотенузную грань призмы оптическая мощность туннелирует в ВЭ. Модуляция выходной оптической мощности обеспечивается изменением субмикрометрового зазора между призмой и ВЭ, испытывающим изгибные деформации. Оптическая мощность отражённого луча детектируется фотоприёмником на второй катетной грани призмы. Сигнал от фотоприёмников поступает в электронный блок обработки, который линеаризует функцию преобразования в соответствующем модуле и передаёт информацию на однопольный интерфейс.

Исследование показало, что использование дифференциального включения оптических узлов считывания и модуля линеаризации функции преобразования позволило уменьшить погрешность нелинейности гравиметра до уровня погрешности вычислений среды моделирования. Предложен алгоритм функционирования электронного блока обработки, позволяющий компенсировать влияние погрешностей, обусловленных внешними факторами, например, изменением температуры или действием поперечных сил. Разработаны трёхмерные модели элементов оптического гравиметра. Проведено исследование влияния погрешностей узлов на характеристики преобразователя.

Список литературы

1. Busurin V.I., Zhiglov M.A., Shleenkin L.A., Korobkov K.A., Bulychiev R.P. Development of an algorithm to suppress frequency splitting of an axisymmetric resonator of a wave solid-state gyroscope with optical detection // *Measurement Techniques*. 2020. V. 62. No. 10. P. 879-884.
2. Busurin V.I., Korobkov K.A., Shleenkin L.A., Makarenkova N.A. Compensation linear acceleration converter based on optical tunneling // 27th International Conference on Integrated Navigation Systems. Saint-Petersburg, 2020. P. 1-4. doi: 10.23919/ICINS43215.2020.9133810.

О.С. КОМАРОВА, В.В. ЛЕНТОВСКИЙ, Д.Л. ФЕДОРОВ
*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург*

ИЗУЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПЕЛЕНГАТОРОВ В ТЕХНИЧЕСКОМ ВУЗЕ С УЧЁТОМ РЕТРОСПЕКТИВЫ

В работе рассмотрен один из возможных подходов к обучению студентов специальным дисциплинам, связанным с оптико-электронными устройствами обработки информации.

O.S. KOMAROVA, V.V. LENTOVSKII, D.L. FEDOROV
*Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov,
Saint-Petersburg*

STUDY OF OPTICAL DIRECTION FINDINGS AT THE TECHNICAL UNIVERSITY ACCORDING TO ITS HISTORY

This article considers one of the possible approaches of teaching students special disciplines related to optical-electronic information processing devices.

При подготовке специалистов в техническом высшем учебном заведении кроме передачи им теоретических знаний и навыков работы с измерительной и специализированной техникой, с нашей точки зрения, полезным является знакомство студентов с историей развития техники, а также с причинами, обусловившими конкретные технические решения.

В оптико-электронных системах большой интерес представляют оптические и инфракрасные локации и пеленгаторы, например, инфракрасные пеленгаторы с модулирующими дисками, широко применяемые в пятидесятых годах прошлого века и современные системы с матричными приёмниками и электронным сканированием. Макеты этих устройств были созданы в учебной лаборатории для исследования и доработок в рамках студенческих исследовательских работ.

Была создана модель тепlopеленгатора, прибора, предназначенного для определения угловых координат оптически контрастных объектов за счёт использования их собственного теплового излучения. В состав макета входят: полупроводниковый лазер и сферическое зеркало, которые совместно являются имитаторами протяжённой цели, анализатор, фотоприёмник и осциллограф в качестве видеоконтрольного устройства.

Анализатор выполняет три задачи: последовательно просматривает поле зрения прибора в фокальной плоскости; анализирует попадающие в поле зрения теплоизлучающие предметы, модулирует тепловой поток, приходящий от цели.

Анализатор представляет собой вращающийся плоский тонкий диск в виде прозрачного круга, на который нанесён определённый рисунок (растр). Студенты исследуют растровые анализаторы, собирают экспериментальную установку, настраивают оптическую схему, добиваются необходимого сигнала на осциллографе. Смещением лазера имитируют автоматическое наведение на цель.

Следующий этап – создание макета оптического пеленгатора, в котором в качестве приёмного устройства служит матричный приёмник (камера мобильного телефона), а в качестве имитатора цели полупроводниковый лазер и световозвращатели: катафоты и белый лист бумаги, в роли диффузного отражателя, для наглядного представления эффективности использования световозвращателей.

Была проведена имитация вращающегося корабельного лоатора, лазер наводился сначала на правый световозвращатель, затем на лист бумаги и левый отражатель. Отражённый от них луч попадает в объектив камеры. Были проведены, расчёты показывающие, что интенсивность излучения от бумаги во много раз меньше, чем от световозвращателей.

Была написана программа, позволяющая обработать полученные с приёмника данные и определить его координаты. Извлечение данных о координатах происходит по методу прямого фотодетектирования. В результате аппроксимации экспериментальных данных, полученных при исследовании макета, были сделаны оценки возможного поведения судов в реальной обстановке. В частности, для судна, движущегося со скоростью 60 км/час и обнаруживающего маяк на расстоянии 15 км, время для корректировки курса составит более десяти минут. Обнаружение маяка на опоре моста на дальности менее километра, даёт возможность автоматике скорректировать курс за десятки секунд.

Несмотря на то, что исследование механических анализаторов в настоящее время, в связи с появлением многоплощадочных приёмников и ПЗС-матриц, потеряло актуальность, работа руками и головой, остается актуальной всегда. Кроме того, в условиях мощного радиоэлектронного противодействия, в интеллектуальных системах для управляемого оружия, возможно, снова придется использовать механические и аналоговые системы, конечно, на качественно новом уровне.

М.В. ЦВЕТКОВ, И.Н. ПАВЛОВ

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА НАРУШЕННОГО ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ В БИОСЕНСОРИНГЕ

Рассмотрены различные методы функционализации поверхности, выбран наиболее эффективный из них для реализации на экспериментальной установке, работа которой основана на методе нарушенного полного внутреннего отражения широкого коллимированного лазерного пучка с целью демонстрации возможности использования данной экспериментальной установки в качестве основы для биосенсоров.

M.V. TSVETKOV, I.N. PAVLOV

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

USING THE METHOD OF FRUSTRATED TOTAL INTERNAL REFLECTION IN BIOSENSING

Various methods of surface functionalization are considered and the most effective of them is chosen for the implementation of the method of frustrated total internal reflection of a wide collimated laser beam on an experimental installation, which will show the possibility of using this experimental installation as a biosensor.

На данный момент биосенсоры широко используются во всех ведущих странах мира в разных отраслях науки, таких как медицина, химическая, сельскохозяйственная и пищевая промышленности и других для исследования различных веществ и их взаимодействий. В биосенсорах используются различные методы для функционализации рабочей поверхности и детектирования исследуемого вещества.

В области биосенсоров очень плотно закрепился метод поверхностного плазменного резонанса (ППР) [1], так как имеет достаточно хорошую чувствительность, быстроту реализации эксперимента и достаточно хорошую разрешающую способность. Однако этот метод хоть и позиционирует себя как более бюджетный способ в отличие от других более старых методов, но также остается не дешёвым из-за напыления металлической, в большинстве случаев золотой, подложки на рабочую поверхность призмы. Такая подложка позволяет при помощи пропускания через неё некоторого электрического заряда, создавать более стабильную функционализированную поверхность.

Метод нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) известен в науке уже давно и не уступает в разрешающей способности и чувствительности ППР [2], при этом в нём отсутствует металлическое напыление, что удешевляет его применение в биосенсорах.

На данный момент существуют несколько основных принципов функционализации поверхности [3]. Адсорбция – наиболее простой метод, который практически не требует подготовки компонентов сенсора и использования химических реагентов. Частицы при физическом контакте удерживаются на подложке с помощью сил Ван-дер-Ваальса. Включение в полимер – такой метод является универсальным, применимым для различных типов распознающих элементов. Биологические активные элементы захватываются полимером, который в свою очередь наносится на подложку. Сшивка – данный метод применяется совместно с другими методами или отдельно, когда молекулы биологического материала связаны между собой или опорной плоскостью. Ковалентное связывание – предполагает создание ковалентной связи между биоматериалом и подложкой. Капсулирование (изоляция) с помощью мембран – используется для создания электрохимических сенсоров. Способ состоит в том, что ферменты размещаются вблизи электрода, отделённые от остального раствора полупроницаемой мембраной, через которую могут проходить молекулы аналита и продукты каталитической реакции. Все эти способы имеют свои преимущества и недостатки.

В рамках данной работы будет произведено аналитическое сравнение данных методов, и выбор наиболее подходящего из них, который в дальнейшем будет реализован на экспериментальной установке.

Список литературы

1. Сотников Д.В., Жердеев А.В., Дзантиев Б.Б. // Успехи биологической химии. 2015. Т. 55. С. 391-420.
2. Павлов И.Н. // Измерительная техника. 2020. № 2. С. 45-49.
3. Маслова Н.Е., Крылова Т.С., Гараева М.Я., Мамичев Д.А. // Молекулярная медицина. 2013. № 5. С. 8-15.

М.А. ИВАНОВ, Н.Г. ИРОШНИКОВ, А.В. ЛАРИЧЕВ
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АСТИГМАТИЗМА НА ДЕТАЛИЗАЦИЮ ИЗОБРАЖЕНИЙ ГЛАЗНОГО ДНА

Приведены результаты исследования влияния астигматизма на детализацию изображений глазного дна. Предложен критерий интегральной оценки детализации. Определён диапазон величины астигматизма, позволяющий надёжно детектировать признаки диабетической ретинопатии.

М.А. IVANOV, N.G. IROSHNIKOV, A.V. LARICHEV
Lomonosov Moscow State University

INVESTIGATION OF THE ASTIGMATISM INFLUENCE ON THE FUNDUS IMAGE DETAILS

We present the results of the astigmatism influence on the fundus images detailing study. We propose a criterion for the integral assessment of image detailing. This criterion was used to determine the range of the astigmatism magnitude where the reliable detection of diabetic retinopathy signs is possible.

Регулярное обследование глазного дна является необходимой процедурой обследования для ряда как офтальмологических, так и общесистемных заболеваний человека и позволяет выявлять такие заболевания на ранних стадиях. Для этого необходимо иметь возможность различать структуры размером порядка 1 - 6 мкм [1]. Целью данного исследования являлось изучение влияния аберрации астигматизма на детализацию изображений глазного дна и оценка максимального его значения, при котором эффекты, вызываемые искажениями, ещё позволяют детектировать специфические для соответствующих заболеваний структуры.

Для моделирования искажения изображений глазного дна решалась прямая задача распространения некогерентного излучения в оптической системе глаза человека в типичном для рассматриваемой ситуации изопланарном приближении, которая описывается с помощью двумерного интегрального уравнения Фредгольма первого рода типа свёртки с передаточной функцией, которая включает в себя фазовый множитель, отражающий заданные аберрации, а также наличие зрачка [2].

Полученные симулированные изображения для 10 различных образцов глазного дна, также как и исходные неискажённые, подвергались обработке с помощью библиотеки PIQ [3] для языка программирования Python. Таким образом были получены зависимости критериев оценки качества изображений: надёжность визуальной информации (VIFp) [4] и величины градиентного отклонения (GMSD) [5] от величины астигматизма в сравнении с радиусом фокального пятна (рис. 1).

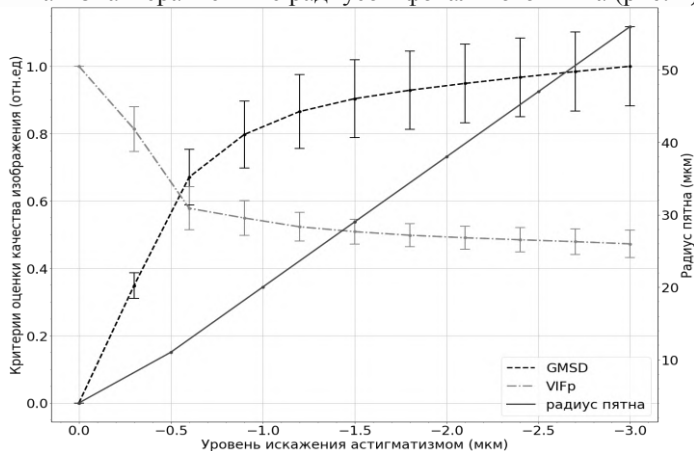


Рис. 1. Зависимости критериев оценки качества изображений от величины астигматизма

Таким образом, нами было обнаружено, что наличие астигматизма у пациента свыше 0.7 мкм (0.75 дптр) (соответствует размеру фокального пятна 10 мкм) существенно влияет на возможность обнаружения начальных проявлений заболеваний. Представляется важным учитывать этот факт при массовом тестировании пациентов.

Список литературы

1. Raman R., et al. Retinal sensitivity over hard exudates in diabetic retinopathy // J Ophthalmic Vis Res. 2015. V. 10 (2). P. 160-164.
2. Ирошников Н.Г., Ларичев А.В., Разгулин А.В., Старостин А.С. Об одном модифицированном биспектральном методе восстановления изображений в офтальмологии // Прикладная математика и информатика. 2014, № 47. С. 82-98.
3. Kastyulin S., et al. PyTorch Image Quality: Metrics and Measure for Image Quality Assessment. 2019.
4. Sheikh H.R., Bovik A.C. Image information and visual quality // IEEE Transactions on Image Processing. 2006. V. 15(2). P. 430-444.
5. Wufeng X., et al. Gradient magnitude similarity deviation: a highly efficient perceptual image quality index // IEEE Transactions on Image Processing. 2013. V. 23.

Э.И. ИБРАГИМОВА, И.Н. ПАВЛОВ

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

ПРОГРАММА ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ОРГАНОВ ДЫХАНИЯ ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Приведено описание экспериментальной установки для получения изображений, по которым возможна оценка эффективности средств защиты органов дыхания оптическим методом. Подробно описана программа для обработки полученных изображений.

E.I. IBRAGIMOVA, I.N. PAVLOV

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

IMAGE PROCESSING PROGRAM FOR ASSESSING OF THE EFFECTIVENESS OF RESPIRATORY PROTECTION PRODUCTS BY OPTICAL METHOD

Presents a description of the experimental installation to obtain images that allow to assess the effectiveness of respiratory protection using the optical method. The program for processing the received images is described in detail.

С началом пандемии COVID-19 в нашу жизнь вошли такие средства защиты органов дыхания, как маски [1]. Маски задерживают аэрозольные частицы, которые образуются при чихании и кашле, благодаря чему в воздух попадает меньше вирусных частиц и опасность инфицирования для окружающих снижается [2]. Сейчас на рынке представлено множество их вариаций, а также предлагается делать маски самостоятельно, поэтому оценка эффективности средств индивидуальной защиты органов дыхания является актуальной темой в современных реалиях.

Целью работы является экспериментальное исследование способности различных видов масок задерживать аэрозольные частицы, а также исследование параметров прошедших частиц.

Экспериментальную установку можно разделить на три основные части. Механическая часть предназначена для создания и распыления капель. Далее аэрозольные частицы вместе с потоком воздуха проходят через маску и попадают на лазерную плоскость, которая предназначена для визуализации капель жидкости. Изображения, полученные с помощью

цифрового фотоаппарата, обрабатываются с помощью разработанной программы.

Программа была написана на языке C++ и qml с помощью графического фреймворка Qt [3]. Основные расчёты были проведены с помощью библиотеки opencv [4]. Работу программы можно разделить на два основных этапа, это определение границ капель и расчёт их параметров.

Для определения положения контуров капель используется функция Canny, которая работает по принципу алгоритма Кэнни. Это популярный алгоритм обнаружения краев. Он был разработан Джоном Ф. Кэнни в 1986 году [5]. Для выделения контуров используется функция findContours. Эта функция извлекает контур из двоичного изображения. Для расчёта интенсивности используется функция mean. Она вычисляет среднее значение элементов массива. В данном случае это чёрно-белое изображение, каждый пиксель которого характеризуется числовым значением. Для расчёта площади контура используется функция contourArea, которая использует по формулу Грина.

В результате работы программы были получены такие данные, как количество пятен на изображении, площадь и средняя относительная интенсивность каждого пятна.

В результате выполнения работы планируется получить сравнительную характеристику различных типов масок. Будут исследоваться размеры прошедших капель, их количество, объём прошедшей жидкости и т.д. Также планируется исследовать зависимость эффективности масок от времени использования.

Список литературы

1. Drewnick F. et. al. // Aerosol Science and Technology. 2021. V. 55 (1). P. 63.
2. URL: <http://rospotrebnadzor.ru>.
3. URL: <https://doc.qt.io/>.
4. URL: <https://docs.opencv.org/>.
5. Ziqi X., et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 1955. P. 012080.

В.М. КОТОВ

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН*

ФУРЬЕ-ОБРАБОТКА ДВУМЕРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСЕЧЁННЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ФИЛЬТРОВ

На основе компьютерного моделирования исследован процесс выделения контура изображения в процессе его фурье-обработки с помощью передаточных функций, в которых постепенно удаляется их «рабочая» поверхность. Показано, что в отдельных случаях возможно удаление до 80 % поверхности без существенного ухудшения качества обработки.

V.M. KOTOV

Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS

FOURIER PROCESSING OF TWO-DIMENSIONAL IMAGES USING TRUNCATED SPATIAL FILTERS

On the basis of computer modeling, the process of image edge enhancement in the process of its Fourier processing with the help of transfer functions, in which their "working" surface is gradually removed, has been investigated. It is shown that in some cases it is possible to remove up to 80 % of the surface without a significant deterioration in the quality of processing.

В процессе использования акустооптических (АО) элементов в качестве фильтров пространственных частот оказалось, что фильтры с сильно неоднородным распределением передаточных функций могут выполнять те же операции, что и фильтры с симметричным распределением [1 - 3]. Аналитическими методами невозможно доказать эквивалентность таких фильтров. В работе выполнено компьютерное моделирование простейших фильтров и на их основе исследовано изменение фильтрующих характеристик с постепенным удалением их «рабочей» поверхности. Показано, что при удалении до 80 % «рабочей» поверхности фильтра он продолжает выполнять операцию выделения контура. На рис. 1 представлен вид фильтра с распределением передаточной функции в виде конуса (рис. 1а), того же фильтра, но с удалением ~ 80 % его рабочей поверхности (рис. 1б), исходные изображения в виде прямоугольника (рис. 1в) и круга (рис. 1г), а также

результат фурье-обработки этих изображений с помощью фильтра (рис. 1б) и – изображения на рис. 1д и 1е.

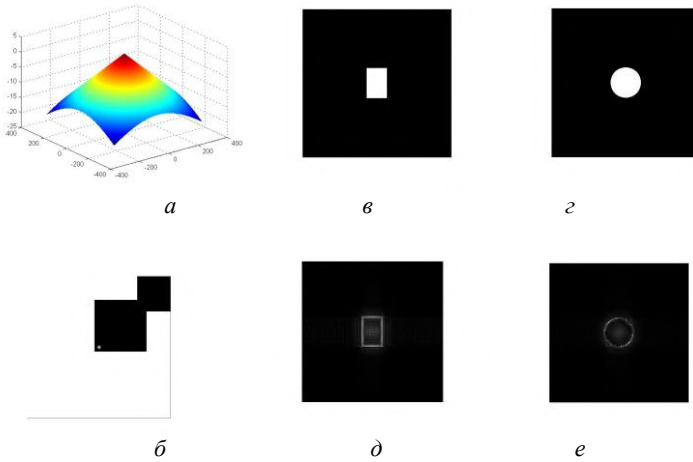


Рис. 1. Вид передаточных функций и фурье-обработка изображений

Видно, что изображения с рис. 1д и 1е являются хорошо выраженными контурами изображений с рис. 1в и 1г. Другими словами, «усечённый» фильтр сохраняет свои фильтрующие свойства даже после удаления 80 % его рабочей поверхности. Однако результат обработки существенно зависит от размеров и формы удаляемого участка пространственного фильтра.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме 0030-2019-0014, а также при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-07-00071).

Список литературы

1. Kotov V.M., Averin S.V., Kotov E.V., Shkerdin G.N. Acousto-optic filters based on the superposition of diffraction fields // *Applied Optics*. 2018. V. 57. No. 10. P. C83-C92.
2. Котов В.М., Аверин С.В., Котов Е.В. Выделение двумерного контура изображения с использованием поляризационно-независимой акустооптической дифракции // *Квантовая Электроника*. 2018. Т. 48. № 6. С. 573-576.
3. Котов В.М., Аверин С.В. Выделение двумерного контура изображения с использованием двух порядков брэгговской дифракции // *Квантовая Электроника*. 2020. Т. 50. № 3. С. 305-308.

Л.И. БУРМАК

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

АКУСТООПТИЧЕСКАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ НЕКОЛЛИНЕАРНЫХ ИНТЕРФЕРИРУЮЩИХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ

Рассмотрены особенности акустооптической фильтрации интерферирующих световых пучков, распространяющихся под углом друг к другу для формирования интерференционной картины в виде полос равной толщины, обусловленные угловой зависимостью характеристик акустооптического фильтра.

L.I. BURMAK

Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow

ACOUSTO-OPTIC FILTRATION OF NON-COLLINEAR INTERFERING LIGHT BEAMS

The features of acousto-optic filtration of interfering light beams propagating at an angle to each other to form an interference pattern with fringes of equal thickness due to the angular dependence of the characteristics of the acousto-optic filter are discussed.

Применение акустооптической (АО) фильтрации в выходном канале интерферометра позволяет создавать схемы мультимодальной оптической когерентной томографии со сканированием в спектральной области и цифровой голографии [1, 2]. В таких схемах АО фильтрация одновременно опорного и объектного интерферирующих световых пучков должна не только обеспечивать передачу изображения в пучке с минимальными потерями качества, как в обычных изображающих системах, но также и не должна ощутимо исказить интерференционную картину. Характеристики АО фильтра имеют как спектральную, так и угловую зависимости. В интерференционных схемах для формирования интерференционных полос конечной толщины пучки направляют так, чтобы они распространялись под углом друг к другу, что обуславливает неодинаковость условий их АО взаимодействия.

Каждую спектральную составляющую широкополосного светового пучка, имеющего конечный угловой спектр, на входе в АО ячейку можно представить в виде композиции плоских волн, распространяющихся под различными углами θ_i и имеющих амплитуду [3]:

$$U_i(\theta_i) = \int u_i(z) \exp\{jk_i z \sin \theta_i\} dz,$$

где k_i – волновое число падающей световой волны в АО кристалле; $u_i(z)$ – распределение амплитуды падающей световой волны. Аналогичным образом можно представить акустическую волну.

Эффективно взаимодействовать друг с другом будут только те световые и акустические компоненты, волновые векторы которых удовлетворяют условию синхронизма. Это условие можно записать через дельта-функцию при интегрировании по углу для нахождения углового распределения излучения после дифракции [3]:

$$U_d(\theta_d) \sim \int_{-\infty}^{\infty} U_i(\theta_i) T(\theta_i) \cdot \delta\left(\frac{n_d}{n_i} \theta_d - \frac{K_0}{k_i} - \theta_i\right) d\theta_i,$$

где $T(\theta_i)$ – функция пропускания АО фильтра; k_d – волновое число дифрагировавшей световой волны в АО кристалле; n_d – показатель преломления материала АО кристалла для дифрагировавшего излучения.

При АО фильтрации интерферирующих пучков возможен вариант, когда один из пучков попадает в синхронизм, а второй нет, либо оба не попадают. Это приведет к тому, что при формировании интерференционной картины $I(x, y)$ в виде полос равной толщины возникнет неодинаковость интенсивностей пучков, приводящая к снижению интерференционного контраста:

$$I(x, y) \sim \iint 2\sqrt{U_{1d}(\theta_{1d})U_{2d}(\theta_{1d})} \cos(k_d \cdot 2d(x, y, \Delta\theta)) d\theta_{1d} d\theta_{2d}$$

где $d(x, y, \Delta\theta)$ – функция, описывающая разность хода.

Данная особенность должна быть учтена при разработке схем с акустооптической фильтрацией в выходном канале интерферометра.

Список литературы

1. Machikhin A.S., Pozhar V.E., et. al. // Applied Optics. 2015. V. 54 (25). P. 7508-7513.
2. Burmak L., Zyкова L., et. al. // J. of Physics Conference Series. 2019. V. 1421. P. 012055.
3. Balakshy V.I. // Optics & Laser Technology. 1996. V. 28 (2). P. 109-117.

В.И. ТЕЛЕШЕВСКИЙ, С.В. БУШУЕВ, С.Г. ГРИШИН¹

Московский государственный технологический университет «Станкин»

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

АКУСТООПТОЭЛЕКТРОННОЕ УПРАВЛЕНИЯ ФАЗОЙ В ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Предложены способ и устройство акустооптоэлектронного управления фазой оптического излучения на основе акустооптического взаимодействия, в результате которого фаза сигнала от электронного генератора переносится в фазовый сдвиг световой волны в плюс-минус первом дифракционном порядке. Полученное решение позволяет проводить управление сдвигом фаз в лазерной интерферометрии с высокой разрешающей способностью и без использования традиционных электромеханических движителей.

V.I. TELESHEVSKY, S.V. BUSHUEV, S.G. GRISHIN¹

Moscow State University of Technology (Stankin)

¹National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow

ACOUSTO-OPTOELECTRONIC PHASE SHIFT CONTROL IN LASER INTERFEROMETRY

Presents a method and a device for acousto-optoelectronic control of the phase shift based on acousto-optical interaction as a result of which the phase of the signal from the electronic generator is transferred to the phase shift of the light wave in the first plus or minus diffraction order. The resulting solution allows phase shift control in laser interferometry with high resolution and without the use of traditional electromechanical movers.

Традиционно фазовый сдвиг осуществляется за счёт механического перемещения референтного зеркала интерферометра посредством соответствующего привода (пьезоэлектрического, магнитострикционного, индукционного и др.) [1]. Однако данные методы имеют ряд недостатков, к которым относятся высокое напряжение питания для подачи на подвижные актюаторы, нелинейность, гистерезис, старение и др.

Предлагается способ и устройство управления фазовым сдвигом в лазерных измерительных интерференционных системах (ЛИИС) на основе акустооптического взаимодействия, особенностью которого является перенос фазы электрического возбуждения модулятора в фазу оптической световой волны посредством Брэгговской дифракции света на ультразвуке. При этом реализацию фазовых сдвигов в измерительном и

опорном плечах ЛИИС предлагается проводить с использованием одного или двух акустооптических модуляторов (АОМ) и фазосдвигателя на базе микроконтроллера с управляемой линии задержки сигнала от общего генератора (рис. 1). Система обеспечивает достаточное количество шагов сдвига фаз для реализации, дискретность сдвига фазы световой волны менее 1 нм, в том числе, и за счёт того, что фазовая модуляция управляющего сигнала отличается существенно лучшей помехозащищённостью в сравнении с амплитудным управлением в системах механического обеспечения сдвига фаз.

Для иллюстрации работоспособности метода была собрана экспериментальная установка (рис. 2) на базе лазера Renishaw XL-80 (длина волны 632,8 нм). Результаты работы были отражены в патентах [2], зарегистрированных в Федеральном институте промышленной собственности. Возможными вариантами использования является модуляционная интерференционная микроскопия, находящая применение при контроле геометрии в оптоэлектронике и в микроэлектронике, а также при проведении исследований биологических структур (структуры клеток, пептидных молекул и вирусных тел) с разрешающей способностью от 0,1 нм, в том числе в режиме реального времени.

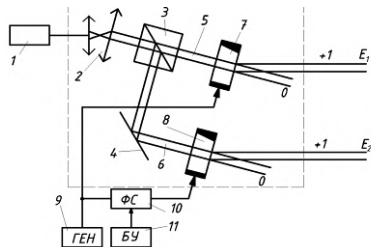


Рис. 1. Схема внедрения двух акустооптических модуляторов в ЛИИС:
1 – лазер, 2 – коллиматор,
3 – светоделитель, 4 – полупрозрачное зеркало, 5, 6 – световые пучки, 7, 8 – АОМ,
9 – генератор, 10 – фазосдвигающее устройство, 11 – блок управления



Рис. 2. Экспериментальная установка по акустооптоэлектронному управлению фазовым сдвигом

Список литературы

1. Григорьев С.Н., Телешевский В.И., Андреев А.Г., Игнатьев П.С., Индукаев К.В., Кольнер Л.С., Осипов П.А. Метрологическая аттестация лазерных микроскопов на основе принципов модуляционной интерферометрии с управляемым фазовым сдвигом // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2015. № 3(34). С. 67-75.
2. Телешевский В.И., Гришин С.Г., Бушуев С.В. Способ управления фазовым сдвигом в интерференционных системах. Патент РФ № 2640963. Бюл. № 2. 12.01.2018.

И.Р. РОДИН, И.Н. ПАВЛОВ

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ В ЖИДКОСТИ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОЙ ПЛОСКОСТИ

Исследовалась визуализация звуковых полей в жидкостях с помощью лазерных методов. Приведена схема установки, а также способ определения параметров акустического поля. Получены поля скоростей частиц алюминиевой пудры в воде.

I.R. RODIN, I.N. PAVLOV

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

VISUALIZATION OF A SOUND FIELD IN A LIQUID USING A LASER PLANE

The visualization of sound fields in liquids was investigated using laser methods. A diagram of the setup is presented, as well as a method for determining the parameters of the acoustic field. Velocity fields of aluminum powder particles in water are obtained.

Исследование с помощью лазерных методов акустических полей в жидкостях представляет собой большой научный интерес, так как ультразвук находит широкое применение в различных областях, таких как медицина, промышленность, строительство и других. Научные исследования в данной области позволяют задать эталоны различных параметров акустического поля: звуковое давление, колебательная скорость и др.

В данной работе экспериментально исследовалось звуковое поле с помощью установки, схема которой показана на рис. 1.

Блок формирования лазерной плоскости 2 состоит из двух цилиндрических линз, одна из которых короткофокусная и служит для создания расходящейся лазерной плоскости, а другая для коллимации этой плоскости, т.е. создания малорасходящейся широкой плоскости.

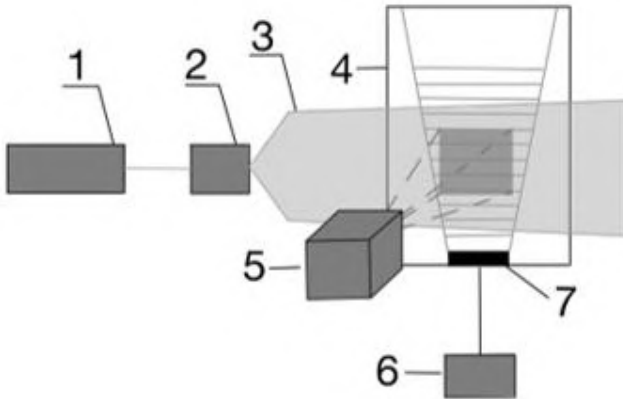


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 – лазер; 2 – блок формирования лазерной плоскости 3; 4 – кювета, в которой создаётся акустическое поле в жидкой среде; 5 – цифровая видеокамера;
6 – генератор переменного напряжения ультразвуковой частоты;
7 – пьезоэлектрический излучатель

Для определения параметров акустического поля в жидкости в данной работе было изучено движение частиц алюминиевой пудры в воде, при разных значениях частоты звукового поля (от 120 до 152 кГц с шагом в 2 кГц), и в программе PIVview построено поле скоростей этих частиц.

Список литературы

1. Расковская И.Л., Павлов И.Н., Ринкевичюс Б.С. Лазерная диагностика акустических полей в жидких средах // Оптика и спектроскопия конденсированных сред: материалы XXV Межд. науч. конф. (под науч. ред. В.А. Исаева, А.В. Лебедева). Краснодар: Кубанский гос. ун-т, 2019. С. 138-141.
2. Цеханович А.И., Петросян С.А., Цысарь С.А., Сапожников О.А. Шлирен-система для исследования структуры ультразвуковых полей в жидкости // Учёные записки физического факультета московского университета. 2020. № 5. С. 2050802.

А.Л. ФИЛАТОВ¹, А.П. МАРКОВ^{1,2}, А.Н. ЮРКОВА¹

¹*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН*

²*Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)*

НЕЙРОСЕТЬ ДЛЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ МОЛНИИ НА ПОЛУЧЕННЫХ С ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЫ СНИМКАХ

Впервые показана возможность применения нейронных сетей для локализации положения молний на снимках, полученных с геостационарной орбиты. Полученные программные решения предполагается использовать для устранения аппаратных искажений фильтрации, которые возникают при установке широкоапертурных акустооптических фильтров в детекторах молний.

A.L. FILATOV¹, A.P. MARKOV^{1,2}, A.N. YURKOVA¹

¹*Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS*

²*Moscow Aviation Institute (National Research University)*

A NEURAL NETWORK FOR LIGHTNING POSITIONS LOCALIZATION ON GEOSTATIONARY LIGHTNING MAPPERS

For the first time, the possibility of using neural networks to localize the position of lightning in images obtained from a geostationary orbit is shown. The obtained software solutions are supposed to be used to eliminate hardware filtering distortions that arise when installing wide-aperture acousto-optic filters in lightning detectors.

Роскосмос разрабатывает и планирует вывести на геостационарную орбиту детектор молний (ДМ) [1]. NASA уже запустило систему GLM (Geostationary Lightning Mapper) на спутнике GOES-16 [2] в 2017 году. Американский геофизический союз (AGU) выкладывает [3] в открытый доступ полученные GLS изображения, рассчитывая на сотрудничество с иностранными учеными в обработке этих изображений. В работе [4] было показано, что широкоапертурная акустооптическая (АО) фильтрация [5 - 8] позволяет предложить новые технические решения для монохромных систем картирования поверхности Земли геостационарного базирования. При замене интерференционного штатного фильтра на АО фильтр (АОФ) возникают аппаратные угловые искажения фильтрации, которые, могут привести к ошибочному определению положения молнии.

Поэтому на этапе проектирования предлагается эмулировать работу АОФ с помощью нейронных сетей. Такая эмуляция должна позволить не только проверить качество изготовления АОФ, но и программно устранить аппаратные искажения АОФ.

На рис. 1 представлена часть снимка молниевой активности со спутника GOES-16, полученная 27.05.2017. Для распознавания наличия или отсутствия молнии в каждом пикселе снимка решалась стандартная задача на классификацию с использованием однослойного перцептрона, структура которого показана на рис. 2.



Рис. 1. Снимок

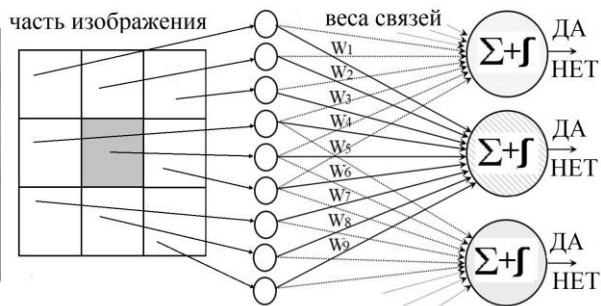


Рис. 2. Блок-схема нейронной сети

Для обучения сети использовался алгоритм обратного распространения ошибки. В качестве обучающего набора использовались 1000 фрагментов изображений областей 80 x 80 грозовой активности. После обучения сеть локализовала пять молний на изображении, представленном на рис. 1. В настоящее время продолжается оптимизация структуры и методов обучения сети.

Работа выполнена в рамках государственного задания.

Список литературы

1. Квитка В.Е., Дюльдин Р.С., Ключников М.В., Прасолов В.О. // Материалы 17-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН. С. 140. DOI 10.21046/17DZZconf-2019a.
2. <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/flashy-first-images-arrive-from-noaa-s-goes-16-lightning-mapper>.
3. Eric et al. // JGR: Atmospheres. V. 124. № 24. P. 14285. DOI 10.1029/2019JD030874.
4. Филатов А.Л., Яременко Н.Г., Карачевцева М.В. // Материалы 18-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН. С. 128. DOI 10.21046/18DZZconf-2020a.
5. Волошинов В.Б., Молчанов В.Я., Бабкина Т.М. // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 9. С. 93-98.
6. Pustovoi V.I., Pozhar V.E. // Proceedings of SPIE. 1999. V. 3750. P. 243-249.
7. Perchik A.V. // Proceedings of SPIE. 2013. DOI: 10.1117/12.2029173.
8. Епихин В.М. // Оптика и Спектроскопия. 2015. Т. 119. № 2. С. 287-294.

М.Н. КУЛАКОВ, Р.С. СТАРИКОВ, П.А. ЧЕРЁМХИН
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ВЛИЯНИЕ ПРОРЕЖЕННОСТИ ОБЪЕКТА НА КАЧЕСТВО ЕГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРИ ОДНОПИКСЕЛЬНОМ ДЕТЕКТИРОВАНИИ

Методы сжатого зондирования позволяют реконструировать изображения объектов из набора регистраций однопиксельного фотодетектора. Путём реализации модели «однопиксельной камеры» исследовано влияние степени прореженности объекта на качество его восстановления.

M.N. KULAKOV, R.S. STARIKOV, P.A. CHEREMKHIN
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

EFFECT OF THE OBJECT MISSING ELEMENTS ON RECONSTRUCTION QUALITY AT SINGLE-PIXEL IMAGING

Compressed sensing allows reconstruct information using a set of single-pixel registrations. By single-pixel camera implementation, the effect of percent of object missing elements on reconstruction quality was investigated.

Идея методов сжатого зондирования («compressive sensing») [1] базируется на том, что сигналы могут быть представлены в разреженном (sparse) виде в некотором базисе. Зарегистрировав несколько сотен или тысяч значений (например, однопиксельных регистраций интенсивности, что на порядки меньше общего числа пикселей цифровой камеры), объект восстанавливается с приемлемым качеством. Достигается это за счёт представления полученных регистраций как проекций сигнала на другой базис (базис измерений), некогерентный с базисом разрежения.

Однопиксельная камера – пример реализации идеи методов сжатого зондирования. Регистрируется суммарная интенсивность излучения от объекта, прореженного микрозеркальным модулятором (МЗМ) [2]. На МЗМ, модулирующий излучение за счёт поворота микрозеркал, выводятся бинарные кадры [3]. Например, в случае вывода случайных значений количество микрозеркал, обеспечивающих «светлые» и «тёмные» пиксели, будет составлять порядка 50%. Однако задействование меньшего процента микрозеркал, качающихся от кадра к кадру, может

обеспечить более устойчивую систему регистрации при частотах отображения в десятки тысяч кадров в секунду.

Исследованы возможности восстановления объекта из набора регистраций при различной степени его прореженности. На рис. 1 показаны зависимости качества восстановления полутонного объекта размером 64×64 и 128×128 отсчётов от степени прореженности. Количество микрозеркал, обеспечивающих «светлые» пиксели МЗМ, в данном случае составляло менее 1 % от общего числа пикселей. Даже при таком небольшом числе ненулевых пикселей и соответственно малом объёме получаемой информации об объекте в каждой регистрации изображение имеет удовлетворительное качество (по пиковому отношению сигнал/шум) и визуально различимо. Дальнейшее увеличение числа ненулевых пикселей обеспечивает выход на насыщение, что объясняется переходом к некогерентности (отсутствию линейной связи) получаемого базиса разрежения объекта с любым фиксированным базисом.

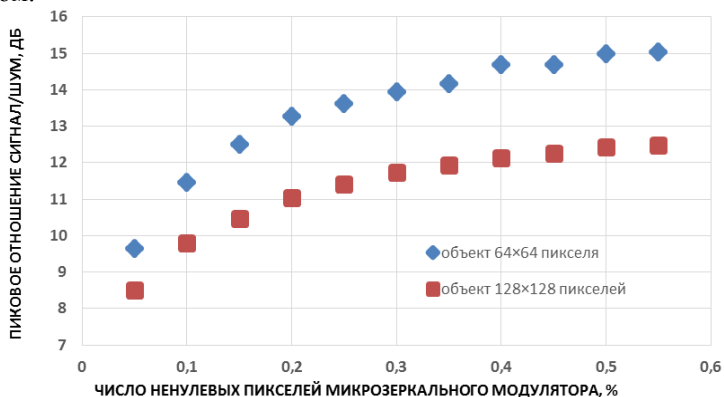


Рис. 1. График зависимости пикового отношения сигнал/шум от степени прореженности объектов размером 64×64 и 128×128 отсчётов

Таким образом, использование даже небольшого количества пикселей МЗМ при каждой однопиксельной регистрации может обеспечить восстановление изображения объекта.

Список литературы

1. Gibson G.M., Johnson S.D., Padgett M.J. // Opt. Express. 2020. V. 28. P. 28190-28208.
2. Edgar M.P., Gibson G.M., Padgett M.J. // Nature Photonics. 2019. V. 13 (1). P. 13-20.
3. Кулаков М.Н., Родин В.Г., Стариков Р.С., Черёмхин П.А. // Известия вузов. Радиофизика. 2020. Т. 63 (8). С. 644-655.

Д.Г. ДЕНИСОВ

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ МИНИМИЗАЦИИ КОНТРАСТА СПЕКЛ-СТРУКТУРЫ В МЕТОДЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

В работе были изучены и представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований подавления статистических характеристик спекл-структуры, формируемой в видеоизображении интерференционной картины. Проанализированы программные и аппаратные методы минимизации контраста спекл-структуры с целью повышения отношения сигнал-шум видеоизображений интерферограмм и как следствие повышение точности определения локальных неоднородностей субнанометрового уровня поверхностей оптических деталей методами динамической интерферометрии.

D.G. DENISOV

Bauman Moscow State Technical University

THE ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF MINIMIZING THE SPECKLE STRUCTURE CONTRAST IN THE METHOD OF DYNAMIC INTERFEROMETRY

The paper studied and presented the results of theoretical and experimental studies of suppression of the statistical characteristics of the speckle structure formed in the video image of the interference pattern. The software and hardware methods for minimizing the contrast of speckle structures are analyzed in order to increase the signal-to-noise ratio of video images of interferograms and, as a consequence, to increase the accuracy of determining local inhomogeneities of the subnanometer level of the surfaces of optical parts using dynamic interferometry.

В общем случае функцию, описывающую структуру локальных отклонений профиля оптической детали, можно представить в виде набора гармоник соответствующих пространственных частот, определяющих такие его технологические параметры, как непрямолинейность и волнистость [1, 2]. Помимо указанных параметров формы профиля, высокочастотные гармоники характеризуют степень шероховатости, которая образуется при съеме материала в процессе формообразования детали полирующими суспензиями [1, 2]. Для описания неоднородностей искажений волновых фронтов при контроле оптических элементов можно использовать международный

классификатор качества изготовления активных лазерных сред технологического комплекса NIF (National Ignition Facility, США) [1], представленный в виде набора характеристик для четырёх пространственно-частотных диапазонов. Для отработки алгоритма полноапертурного (до 1000 мм) аттестационного контроля неоднородностей искажений волновых фронтов при контроле крупногабаритных оптических деталей в I и II диапазонах соответствующих пространственных частот в результате расчёта одномерной целевой функции – спектральной плотности корреляционной функции, была разработана методика и измерительный стенд на базе динамического интерферометра «IntelliumH2000» (ESDI, США). Показано, что в результате проведения экспериментальных исследований в плоскости анализа сформированная интерференционная картина зашумлена спекл-структурой, что в значительной степени усложняет процесс обработки и получения информации о локальных неоднородностях субнанометрового уровня на поверхностях контролируемых изделий. С целью минимизации спекл-структуры в разработанной системе контроля была реализована схема осветительной ветви с вращающимся диффузором (рис. 1) и проведены исследования с точки зрения влияния количества оборотов и положения диффузора на флуктуации интенсивности энергетического профиля лазерного излучения.

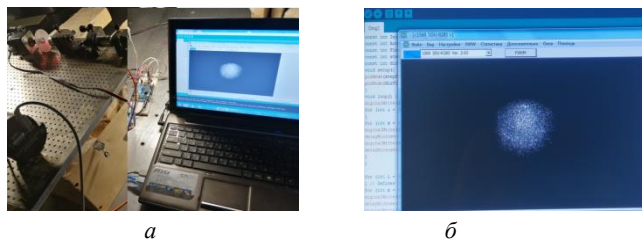


Рис. 1. Фотографии экспериментального стенда (а) для проведения исследований по аппаратной минимизации спекл-структуры (б), формируемой в осветительной ветви динамического интерферометра

Список литературы

1. Денисов Д.Г. Анализ погрешностей при цифровой обработке результатов интерферометрического контроля локальных отклонений нанометрового уровня поверхностей оптических деталей // Компьютерная оптика. 2017. Т. 41. № 6. С. 820-830.
2. Денисов Д.Г., Карасик В.Е. Анализ влияния спекл-структуры на качество изображения интерференционной картины при контроле крупногабаритных оптических поверхностей на стадиях шлифования // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. 2011. № 2. С. 36-47.

Л.А. МАКСИМОВА¹, Н.Ю. МЫСИНА¹, Б.А. ПАТРУШЕВ^{1,2}

¹*Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов*

²*Саратовский национальный исследовательский государственный университет
им. Н.Г. Чернышевского*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СИГНАЛА В ЛАЗЕРНОМ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ ПОПЕРЕЧНЫХ МИКРОСМЕЩЕНИЙ С ГАУССОВЫМИ ОСВЕЩАЮЩИМИ ПУЧКАМИ

Разработана компьютерная математическая модель спекл-интерферометра поперечных смещений рассеивающей поверхности на основе дифракционных преобразований волновых полей. Для моделирования измерительного сигнала использовались численные дифракционные дискретные преобразования пространственных распределений комплексных амплитуд волновых полей. Результаты моделирования согласуются с результатами экспериментальных исследований поперечных температурных смещений в диапазоне до 600 мкм.

L.A. MAKSIMOVA¹, N.Yu. MYSINA¹, B.A. PATRUSHEV^{1,2}

¹*Institute of Precision Mechanics and Control of the RAS, Saratov*

²*National Research Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky*

MODELING OF THE PROCESSES OF FORMATION OF MEASURING SIGNAL IN A LASER SPECKLE INTERFEROMETER OF LATERAL MICRO-DISPLACEMENTS WITH GAUSSIAN ILLUMINATING BEAMS

Developed computer mathematical model of the speckle interferometer of lateral displacements of scattering surface is based on diffraction transformations of wave fields. Numerical diffraction discrete transformations of spatial distributions of complex amplitudes of wave fields were used for simulation of measuring signal. The results of numerical simulation are consistent with results of realized experimental studies of lateral temperature object displacements in the displacement range up to 600 μm .

В работе выполнено численное моделирование процессов формирования спекл-модулированных интерференционных картин и сигналов на выходе спекл-интерферометра поперечных смещений рассеивающего объекта, позволяющее выявить свойства и количественные параметры интерференционных измерительных сигналов. Для моделирования использовались численные расчёты

пространственного распределения комплексных амплитуд волновых полей в интерферометре при освещении смещаемой рассеивающей поверхности лазерными гауссовыми пучками. На рис. 1 представлены фрагменты мгновенных смоделированных спекл-модулированных интерференционных картин, образующихся на выходе спекл-интерферометра и изображения освещённых лазерными гауссовыми пучками областей на рассеивающей поверхности объекта. Для моделирования временных интерферограмм [1, 2], представленных на рис. 2, величина и закон поперечного смещения рассеивающей поверхности $g(t)$ задавалась согласно закону, определённом из эксперимента в результате нагрева и последующего охлаждения исследуемого объекта. Правильность подхода, используемого в численном моделировании, подтверждается совпадением результатов экспериментальных исследований и моделирования, графики смещения на рис. 2в, полученные из натурального эксперимента и моделирования совпадают с большой точностью.

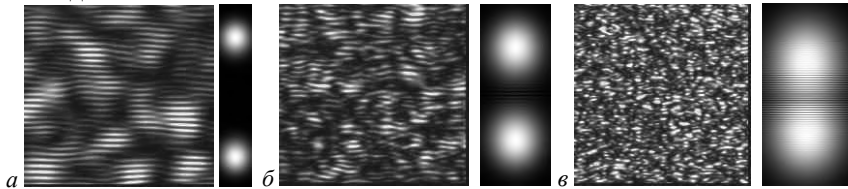


Рис. 1. Смоделированные спекл-модулированные интерференционные картины и изображения пучков в плоскости рассеивающей поверхности, радиус перетяжки пучков 3 мкм, углы падения пучков 30° , длина волны 0,63 мкм, расстояние от рассеивающей поверхности до области наблюдения 10 см, радиус освещающих гауссовых пучков на рассеивающей поверхности w : $w = 4,5$ (а), 10 (б), 20 мкм (в)

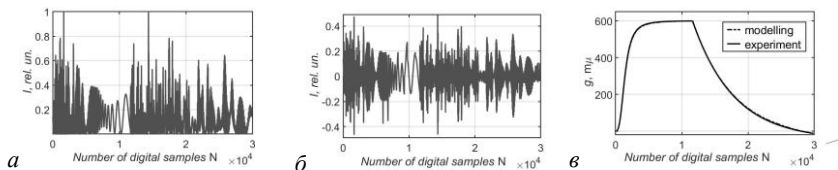


Рис. 2. Смоделированные интерферограммы: исходная (а), с вычтенными средними значениями (б); график поперечного смещения рассеивающей поверхности (в), построенный по интерферограмме (б), длина волны 0,63 мкм

Список литературы

1. Гризбил Б.А., Максимова Л.А., Рябухо В.П. // Комп. оптика. 2020. Т. 44(4). С. 568.
2. Максимова Л.А., Патрушев Б.А., Мысина Н.Ю., Рябухо В.П. // X Межд. конф. по фотонике и информационной оптике: сб. науч. трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2021. С. 441-442.

П.В. ПАВЛОВ, В.В. АРТАНОВ, А.Р. СТЕПАНОВ

*Военный учебный научный центр ВВС «Военно-воздушная академия
им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНУТРЕННИХ ДЕФЕКТОВ В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИИ КАБИН САМОЛЁТОВ МЕТОДОМ СПЕКЛ-СТРУКТУР ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассматриваются результаты испытаний опытного образца аппаратно-программного комплекса спекл-лазерной диагностики, в ходе определения степени выхода остекления из заделки при создании избыточного давления внутри кабины самолёта.

P.V. PAVLOV, V.V. ARTANOV, A.R. STEPANOV

*Military Training and Research Center of the Air Force Academy
named after professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin, Voronezh*

DETERMINATION OF INTERNAL DEFECTS IN THE STRUCTURAL ELEMENTS OF AIRCRAFT CABINS BY THE SPECKLE STRUCTURE OF OPTICAL RADIATION

The results of tests of a prototype of a speckle-laser diagnostic hardware and software complex are considered, during the determination of the degree of exit of the glazing from the sealing when creating excess pressure inside the cabin of the aircraft.

При эксплуатации авиационной техники на клеевое соединение в заделке остекления кабин воздушных судов оказывает негативное воздействие влажность, аэродинамические нагрузки, а также перепады температур, что приводит к нарушению его целостности и к выходу остекления из заделки с последующим разрушением в полёте. Существующие в настоящее время методики неразрушающего контроля, применяемые при оценки целостности клеевого соединения элементов остекления, не позволяют достоверно определить состояние клеевого соединения, что влечет к повышению аварийности и снижению безопасности полётов авиатранспорта государственной авиации Российской Федерации.

Для точного определения параметров дефектов внутри заделки остекления кабин самолётов предлагается использовать метод спекл-структур оптического излучения, который продемонстрировал свою высокую чувствительность при измерениях [1].

Для испытания предлагаемого способа [2] была разработана методика определения выхода остекления из заделки, разработана конструкторская документация по которой изготовлена оснастка для установки и фиксации оптико-электронной системы генерирования и регистрации спекл-полей на кабине воздушного судна. Разработано оригинальное программное обеспечение [3], позволяющее осуществлять регистрацию и вычисление параметров цифровых спекл-полей (рис. 1), по которым оператором проводится анализ степени выхода остекления из заделки.

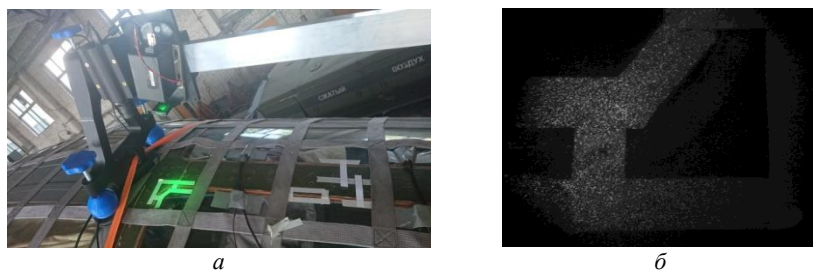


Рис. 1. Регистрация спекл-полей от элементов остекления кабины: установка аппаратно-программного комплекса спекл-лазерной диагностики на кабине (а); зарегистрированное спекл-поле (б)

В ходе испытаний установлено, что метод спекл-структур оптического излучения имеет высокую чувствительность к перемещениям элементов остекления при создании избыточного давления внутри кабины воздушного судна. Разработанный аппаратно-программный комплекс спекл-лазерной диагностики позволяет анализировать динамику перемещений элементов остекления на начальных стадиях создания избыточного давления внутри кабины, что существенно снижает риски нанесения дополнительного разрушения на целостность клевого соединения в процессе эксплуатации.

Список литературы

1. Петров Н.В., Беспалов В.Г., Жевлаков А.П., Солдатов Ю.И. Определение скорости движения объекта в воде с использованием метода цифровой спекл-фотографии // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 11. С. 70-73.
2. Павлов П.В., Вольф И.Э., Степанов А.Р., Евсин А.О., Хакимов Л.Н. Патент RU 2759038. МПК В64F 5/00. опубли. 09.11.21. Бюл. № 31.
3. Павлов П.В., Лагошный И.С., Вольф И.Э., Евсин А.О., Степанов А.Р., Неупокоева А.В. Свидетельство РФ № 2020619977 от 26.08.20.

Б.А. ПАТРУШЕВ^{1,2}, Л.А. МАКСИМОВА¹, В.П. РЯБУХО^{1,2}

¹*Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов*

²*Саратовский национальный исследовательский государственный университет
им. Н.Г. Чернышевского*

СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТР ТАНГЕНЦИАЛЬНЫХ СМЕЩЕНИЙ РАССЕИВАЮЩЕГО ОБЪЕКТА ПРИ ОСВЕЩЕНИИ ОДНИМ ЛАЗЕРНЫМ ПУЧКОМ

Рассматривается спекл-интерферометр смещений рассеивающих объектов с использованием только одного освещающего лазерного пучка. Получены аналитические выражения для спекл-модулированной интерференционной картины, формирующейся в результате слияния двух отфильтрованных полей, рассеянных шероховатой поверхностью объекта. Реализован ряд экспериментов при температурных смещениях рассеивающей поверхности объекта.

B.A. PATRUSHEV^{1,2}, L.A. MAKSIMOVA¹, V.P. RYABUKHO^{1,2}

¹*Institute of Precision Mechanics and Control of the RAS, Saratov*

²*National Research Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky*

SPECKLE-INTERFEROMETER OF TANGENTIAL DISPLACEMENT OF SCATTERING OBJECT WHEN ILLUMINATED WITH A SINGLE LASER BEAM

A speckle interferometer of displacements of scattering objects using only one illuminating laser beam is considered. Analytical expressions are obtained for the speckle-modulated interference pattern formed as a result of the merger of two filtered fields scattered by the rough surface of the object. A number of full-scale experiments were carried out at temperature displacements of the scattering surface of the object.

Разработана дифракционная пространственно частотная теория интерферометра тангенциальных смещений рассеивающей поверхности, описывающая процессы формирования интерференционной картины, возникающей на выходе интерферометра (рис. 1а) и изменяющейся вследствие смещения объекта при его освещении одним сфокусированным лазерным пучком. Использование матричного фотодетектора, в совокупности с системой ввода изображения в компьютер, позволяет проводить запись серии интерференционных картин в эксперименте и последующую их программную обработку для формирования осциллограммы сигнала интерферометра и определения графика смещения $g(t)$ (рис. 1б).

При тангенциальном смещении поверхности возникают различные фазовые сдвиги в волновых полях, сформированных в разных каналах оптической системы, и возникает соответствующая разность фаз полей, которая приводит к смещению интерференционных полос. Интенсивность суммарного поля изображения, в каждой точке x, y которого происходит изменение интенсивности поля в зависимости от величины смещения $\bar{g}(g_x, g_y, t)$, подчиняется выражению:

$$I(x, y; \bar{k}_1, \bar{k}_2; g_x, g_y; t) = I_1(x, y; \bar{k}_1; t) + I_2(x, y; \bar{k}_2; t) + 2|U_1(x, y; \bar{k}_1; t) \cdot U_2^*(x, y; \bar{k}_2; t)| \times \cos((k_{x1} - k_{x2})g_x(t) + (k_{y1} - k_{y2})g_y(t) + \Delta\phi_{12}(x, y; t)) \quad (1)$$

где $\bar{k}_1(k_{x1}, k_{y1})$, $\bar{k}_2(k_{x2}, k_{y2})$ – пространственные частоты рассеянных волн, I_1, I_2 и U_1, U_2 – интенсивности и комплексные амплитуды полей. Число m полуосцилляций $I(t)$ определяется разностью фаз $\Delta\psi(t)$ полей $m = \Delta\psi(g_x, g_y) / \pi = ((k_{x1} - k_{x2})g_x(t) + (k_{y1} - k_{y2})g_y(t)) / \pi$.

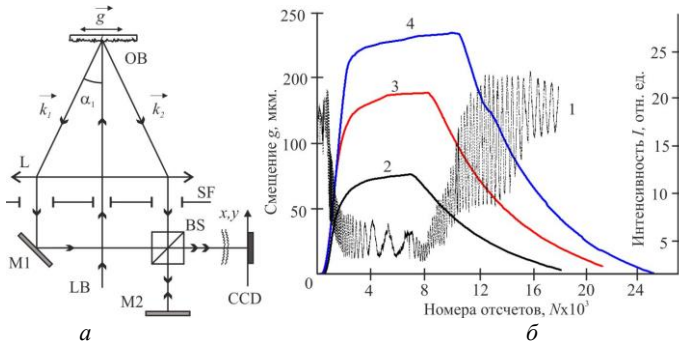


Рис. 1. Оптическая схема спекл-интерферометра (а); цифровая интерферограмма – зависимость интенсивности $I(t)$ в отдельных спеклах поля (кривая 1), возникающая при смещении поверхности $g(t)$, и графики смещения объекта (кривые 2, 3 и 4), восстановленные по интерферограммам для трёх различных режимов нагрева объекта (кривая 2 восстановлена по интерферограмме 1) (б)

Аналитическая теория спекл-интерферометра позволяет моделировать сигнал интерферометра с учётом параметров его реальной оптической системы, что повышает достоверность экспериментальных результатов и точность измерений, благодаря возможности учёта практически всех параметров используемой системы и эффекта спекл-модуляции.

А.М. ЦАРЕВА, Н.И. ШАКИРОВ, К.А. ЦАРЕВА¹,
М.Р. ЗАРИПОВ, Р.Х. МАКАЕВА

*Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ*

¹*Казанский (Приволжский) федеральный университет*

ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ ПРИ ВИЗУАЛИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ КОЛЕБАНИЙ ДИСКА КОМПРЕССОРА

В работе представлены результаты голографических исследований колебаний облопаченного диска компрессора высокого давления авиационного двигателя.

A.M. TSAREVA, N.I. SHAKIROV, K.A. TSAREVA¹,
M.R. ZARIPOV, R.Kh. MAKAEVA

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI

¹*Kazan Federal University*

HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY FOR VISUALIZING COMPLEX OSCILLATIONS OF COMPRESSOR'S DISK

This paper presents the results of holographic studies of an aircraft engine's high pressure compressor's bladed disk's oscillations.

В двигателестроении актуальна проблема исследования колебаний групп сопряжённых сложных элементов как единой деформируемой системы [1]. К ним относятся крупногабаритные диски осевых компрессоров высокого давления авиационного двигателя с лопаточным венцом.

Исследованы вибрационные характеристики облопаченного диска четвёртой ступени компрессора высокого давления газотурбинного авиационного двигателя диаметром 920 мм. Голограммы регистрировались в процессе колебаний стробоголографическим методом. Съёмки крупногабаритного объекта осуществлялись импульсным лазером. Получены голографические интерферограммы трёх последовательных гармоник на резонансных частотах 350, 738 и 1050 Гц. Из них наиболее информативными оказались резонансные колебания на частоте 1050 Гц (рис. 1). Как видно из рис. 1, диск колеблется по форме F_{02} , лопатки совершают, изгибно-крутильные колебания по форме F_{11} .

Амплитуды колебаний лопаток изменяются переменнo: максимальная амплитуда колебаний лопаток наблюдается в местах пучностей колебаний диска, а минимальная – на узловых линиях.

Из-за наличия жёсткого утолщённого обода с закреплёнными лопатками форма колебаний диска отличается от классической формы колебаний F_{02} диска равной толщины [2]. Известно, что собственная (резонансная) частота колебаний диска с лопатками как системы отличается от частоты резонансных колебаний отдельно взятой лопатки. На рис. 2 представлены голографические интерферограммы колебаний лопатки компрессора без диска.



Рис. 1. Интерферограммы колебаний диска

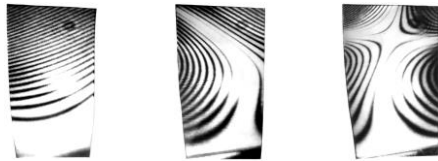


Рис. 2. Голографические интерферограммы колебаний лопатки компрессора без диска $f = 380$ Гц (а), 1270 Гц (б), 2520 Гц (в)

Форма, соответствующая совместным резонансным колебаниям, является второй при частоте $f = 1270$ Гц. Участки с максимальной амплитудой колебаний, а, следовательно, и наиболее вероятного появления дефекта, смещаются с обода в область сопряжения обода с полотном диска. Установлено, что при одной и той же форме колебаний значения резонансных частот отдельно взятой лопатки выше по сравнению с частотой резонансных колебаний по той же форме аналогичной лопатки в системе диск – лопатки.

Таким образом, анализ интерферограмм колебаний диска компрессора показал, что, при рабочих режимах могут возникнуть резонансные явления, связанные с вибрациями самого диска и лопаток. Наличие у диска жёсткого обода с закреплёнными лопатками несколько изменяет форму колебаний по сравнению с классическим диском.

Список литературы

1. Богомолов С.И., Журавлева А.М. Взаимосвязанные колебания в турбомашинах и газотурбинных двигателях. Харьков: Издательское объединение «Вища школа» ХГУ, 1973.
2. Макаева Р.Х., Каримов А.Х., Царева А.М. Диагностика деталей и узлов турбомашин по их вибрационным характеристикам с применением голографической интерферометрии. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. 2011.

К.А. ЗАГОРУЛЬКО¹, А.В. КОЗЛОВ^{1,2}, Н.П. ХАТЫРЕВ¹

¹*Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская обл.*

²*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

ИЗМЕРЕНИЯ ФАЗОВЫХ ШУМОВ УЗКОПОЛОСНЫХ ЛАЗЕРОВ

Экспериментально исследован способ измерений фазовых шумов (ФШ) узкополосных лазеров на основе гетеродинирования с использованием радиочастотных делителей частоты. С помощью делителя частоты в N раз уменьшаются несущая частота и абсолютная нестабильность, а также на $20 \times \log N$ (в единицах дБн/Гц) уменьшаются значения ФШ сигнала биений лазеров. Это позволяет использовать радиочастотные анализаторы ФШ с максимальным значением диапазона измерений ФШ меньше, чем значения ФШ сигналов биений. Проведены измерения ФШ следующих типов одночастотных лазеров: волоконные и диодные РОС-лазеры, диодные лазеры с внешним резонатором типа ITLA и с внешним резонатором на основе волоконной брэгговской решётки.

K.A. ZAGORULKO¹, A. V. KOZLOV^{1,2}, N.P. KHATYREV¹

¹*Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering,
Mendeleevo, Moscow region*

²*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*

PHASE NOISE MEASUREMENTS OF NARROW-LINEWIDTH LASERS

A technique for measuring the phase noise (PN) of narrow-linewidth lasers using heterodyning method with RF frequency divider is experimentally investigated. Frequency divider reduces carrier frequency and absolute instability by a factor of N and reduces the PN of the beat signal by $20 \times \log N$ (in units of dBc/Hz). That allows one to use PN analyzers with maximum measurable PN less than PN of beat signals under test. The phase noise measurements of DFB fiber and diode lasers, a tunable external cavity diode laser (ITLA type) and an external cavity diode laser based on a fiber Bragg grating have been carried out.

Для измерений фазовых шумов (ФШ) узкополосных лазеров, как правило, применяются оптические частотные дискриминаторы на основе волоконных линий задержки [1]. Однако волоконные линии задержки имеют собственные ФШ, которые сложно существенно снизить [2]. Другим подходом к измерению ФШ узкополосных лазеров является метод оптического гетеродинирования, при котором измеряются ФШ

радиочастотного сигнала биений двух лазеров (тестируемого – ТЛ и лазера-гетеродина – ЛГ), полученного с фотоприёмника [1]. В этом случае измеряется суммарное значение ФШ двух лазеров, а ФШ ТЛ должны быть на ≈ 15 дБн/Гц больше ФШ ЛГ. Тогда фактически выполняются прямые измерения ФШ тестируемого лазера с помощью средства измерений ФШ РЧ диапазона с прослеживаемостью измерений к первичным эталонам. Одним из недостатков метода оптического гетеродинирования является то, что значения ФШ узкополосных лазеров могут выходить за пределы диапазона измерений ФШ средств измерений РЧ диапазона [1]. Предлагаемый подход позволяет преодолеть это ограничение за счёт использования РЧ делителя частоты.

Сначала измерялись ФШ сигнала биений двух волоконных РОС-лазеров (РОС-ВЛ) без делителя частоты на 8 (Д8). Далее один из этих лазеров использовался как ЛГ для измерений ФШ остальных лазеров с использованием Д8, так как АФШ не мог корректно измерить ФШ сигнала биений (более +100 дБн/Гц на отстройке 1 Гц). К результатам измерений ФШ с Д8 прибавлялось $20 \times \log 8 = 18$ дБн/Гц. Сделана оценка ФШ, вносимых Д8. Вносимые ФШ Д8 меньше измеренных ФШ сигналов биений лазеров не менее чем на 20 дБн/Гц на всех частотах отстройки. Результаты измерений ФШ лазеров представлены на рис. 1.

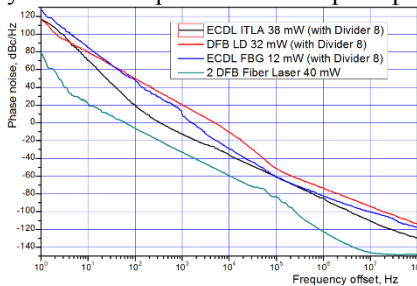


Рис. 1. Результаты измерений ФШ узкополосных лазеров: суммарные ФШ сигнала биений двух РОС-ВЛ не менее чем на 20 дБн/Гц меньше ФШ сигналов биений остальных лазеров с РОС-ВЛ на всех частотах отстройки, поэтому любой из РОС-ВЛ может использоваться как ЛГ

Сообщалось об использовании делителей частоты для измерений ФШ СВЧ-сигналов с несущей частотой больше, чем максимальная частота анализаторов ФШ [3]. Однако, насколько нам известно, в данной работе впервые делитель частоты используется для измерений ФШ оптических генераторов и для увеличения диапазона значений ФШ, измеряемых анализатором ФШ.

Список литературы

1. Camatel S., Ferrero V. // J. of Lightwave Technology. 2008. V. 26. P. 3048-3055.
2. Llopis O., Abdallah Z., et. al. // Proc. 2015 Joint Conference IFCS/EFTF. 2015. P. 602-605.
3. https://www.holzworth.com/Portals/0/hx4920_datasheet.pdf.

П.О. ЯКУШЕНКОВ

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ СИНХРОНИЗАЦИИ МОД ЛАЗЕРА С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ ДЛЯ ГЕНЕРАТОРА НЕСУЩЕЙ В ФОТОННЫХ СХЕМАХ

В работе исследуется синхронизация мод лазера с диодной накачкой для генерации несущей в фотонных информационных системах и приводится сравнение с волоконной накачкой лазера.

P.O. YAKUSHENKOV

Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

INVESTIGATION OF MODE LOCKING OF THE DIODE-PUMPED LASER FOR THE GENERATOR OF A CARRIER TRAIN IN PHOTONIC CIRCUITS

In this article we research the diode pumping of the mode-locked laser for carrier train generation in photonic information systems and compare it with the fiber laser pumping.

Существуют многие способы добиться синхронизации мод: активная синхронизация мод использует генератор [1, 2], 5 ГГц, 48 пс; пассивная синхронизация мод – Kerr Lens Mode-locking (KLM) [3], 82 фс, 4 ГГц, насыщающиеся поглотители [4], 20 пс, 10 ГГц, SESAM [5, 6], 3 пс, 160 ГГц; 6 фс, 86 МГц (Ti:sapphire) и 500 фс, 100 ГГц (MIXEL). Все они предназначены для того, чтобы добиться одинаковой фазы у разных мод, то есть сфазировать моды генерации лазера. Для интегральных фотонных схем таким лазером может быть полупроводниковый, можно выращивать гетероструктуру с полупроводниковым лазером, накачиваемым диодом непосредственно на интегральной схеме, излучение от которого будет сразу выходить в волноводы на ней; либо излучение можно заводить в схему из внешнего источника с лучшими характеристиками, например из волоконного лазера, но с большими потерями. Волоконная накачка может сформировать более хорошую Керровскую линзу, благодаря более оптимальному распределению интенсивности по радиусу пятна. Моды могут синхронизовываться благодаря эффекту Керровской линзы, в котором за счёт поглощения формируется термолинза, модулируя тем самым показатель преломления, что заставляет моды быть в одной и той

же фазе на одном и том же участке оптического пути, генерируя большую интенсивность, которая усиливает эффект до тех пор, пока моды будут синхронизироваться.

Целью данной работы было исследование генерации высокочастотной (ГГц) последовательности импульсов на нелинейном кристалле Nd:YVO₄ с диодной накачкой. На осциллографе наблюдалась высокочастотная последовательность импульсов с частотой 1 ГГц, соответствующая времени обхода резонатора. Мощность накачки увеличивалась, чтобы усилить самофокусировку, все генерируемые моды удавалось полностью синхронизовать, однако когда все моды синхронизируются, процесс самофокусировки заканчивается.

После того как было решено поставить дизайнерское стекло «Конашима» для лучшей самофокусировки, стали наблюдаться стабильные полностью синхронизованные моды – самофокусировка наблюдалась стабильной. В [7] авторы получали синхронизацию мод с волоконной накачкой. Однако при волоконной накачке синхронизация мод и генерация стабильных высокочастотных импульсов была гораздо хуже, чем с диодной накачкой и насыщающимся поглотителем.

Сравнив диодную и волоконную накачку, приходим к выводу, что основную роль для синхронизации мод и генерации стабильных высокочастотных импульсов играет насыщающийся поглотитель, так что на фоне неё разница в Керровской линзе при диодной и волоконной накачке не видна.

Список литературы

1. Летохов В.С., Морозов В.Н. Генерация ультракоротких импульсов когерентного света // ЖТФ. 1967. Т. 52. Вып. 5. С. 1296-1302.
2. Longhi S., Sorbello G., Taccheo S., Laporta P. 5-GHz repetition-rate dual-wavelength pulse-train generation from an intracavity frequency-modulated Er-Yb:glass laser // Optics Letters. 1998. V. 23. No. 19.
3. Leburn C.G., Lagatsky A.A., Brown C.T.A., Sibbett W. Femtosecond Cr⁴⁺:YAG laser with a 4 GHz pulse repetition rate. 2003.
4. Понарина М.В., Охримчук А.Г., Рыбин М.Г., Образцов П.А. ГГц частота повторения пикосекундных импульсов в волноводном Nd:YAG лазере // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2019. № 3.
5. Krainer L., Paschotta R., Lecomte S., Moser M., Weingarten K.J., Keller U. Compact Nd:YVO₄ lasers with pulse repetition rates up to 160 GHz // IEEE Journal of Quantum Electronics. 2002. V. 38. No. 10.
6. Jung I.D., Kärtner F.X., Matuschek N., Sutter D.H., Morier-Genoud F., Zhang G., Keller U. Self-starting 6.5-fs pulses from a Ti:sapphire laser // Optics Letters. 1997. V. 22. P. 1009.
7. Liang H.C., Chen R.C.C., Huang Y.J., Su K.W., Chen Y.F. Compact efficient multi-GHz Kerr-lens modelocked diode-pumped Nd:YVO₄ laser // Opt. Exp. 2008. V. 16 (25). P. 21149-21154.

М.С. КУЗЬМИН, С.А. РОГОВ

*Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича*

ВВОД НИЗКОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ В ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ С ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕЙ НА ВХОДЕ

Рассмотрены методы ввода низкочастотных сигналов в оптические системы обработки, использующие в качестве входного устройства жидкокристаллический пространственный модулятор света с электронным управлением.

M.S. KUZMIN, S.A. ROGOV

The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications

INPUT OF LOW-FREQUENCY SIGNALS INTO OPTICAL INFORMATION PROCESSING SYSTEMS WITH A LIQUID CRYSTAL MATRIX INPUT

Methods of low-frequency signals input into optical processing systems using an electronically controlled liquid crystal spatial light modulator as an input device are reviewed.

Обработку низкочастотных (НЧ) сигналов в ряде задач обработки информации удобно выполнять оптическими методами. В ранних работах для ввода НЧ-сигналов в оптические системы использовалась фотоплёнка или другие, неудобные по ряду параметров устройства ввода [1]. Если заменить эти устройства на современные, например, жидкокристаллические (ЖК) матрицы, то можно получить системы оптической обработки, перспективные для практического применения. Рассмотрим возможности использования таких матриц для ввода в систему обработки НЧ-сигналов.

Число отсчётов в реализации НЧ-сигнала часто невелико, так что весь сигнал может поместиться на одной строке матрицы, содержащей до 1000 и более пикселей. Используя несколько строк матрицы, можно вводить в оптическую систему несколько сигналов для их параллельной обработки. Для сигналов с большим числом отсчётов (до нескольких миллионов) можно применить растровый ввод сигналов в ЖК-матрицу. Более длинные сигналы можно обрабатывать последовательно. На основе оптических систем с ЖК-вводом можно создавать одноканальные и

многоканальные анализаторы спектра и корреляторы сигналов с пространственным интегрированием, в том числе и для обработки длинных сигналов [2, 3].

При вводе сигналов в матрицу следует согласовать скорости поступления информации от источника сигналов и скорость её записи на матрице. Если использовать штатный режим ввода информации в матрицу (за единицы миллисекунд), то длинный, медленно меняющийся НЧ-сигнал предварительно требуется запоминать в буферном устройстве памяти, а потом быстро переносить на матрицу, как в случае обработки одного сигнала, так и при параллельной обработке нескольких сигналов. Такой режим ввода требует использования в системе специального устройства памяти, но не требует изменения схемы ввода на самой матрице. Аналогово-цифровой преобразователь и буферная цифровая память для запоминания порядка миллиона значений НЧ-сигнала имеет небольшие габариты.

Можно вводить сигналы в матрицу медленно, в темпе поступления НЧ-сигнала, при этом не требуется предварительно запоминать сигналы, однако при таком вводе может потребоваться изменить структуру и режим работы драйверов столбцов матрицы, что потребует модернизации конструкции самой матрицы, это сложнее. При параллельном вводе нескольких сигналов в матрицу в темпе их поступления, буферная память также не потребуется, но нужно заменить драйвер столбцов в матрице на набор параллельных входов, соединённых через устройства согласования с источниками сигналов [4]. Такое устройство параллельного ввода сигналов перспективно для использования в ряде практических задач, однако матрицы с параллельным вводом информации пока также не выпускаются промышленностью.

Таким образом, применение ЖК-матриц с электронным управлением является перспективным для ввода НЧ-сигналов в оптические системы обработки информации, причём вариант с буферной памятью не требует изменений в конструкции самой матрицы.

Список литературы

1. Оптическая обработка информации / под ред. Д. Кейсесента. М., Мир, 1980.
2. Кузьмин М.С., Рогов С.А. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. № 15. С. 1-5.
3. Кузьмин М.С., Рогов С.А. // Журнал технической физики. 2015. Т.84. № 4. С. 156-158.
4. Kuzmin M.S., Rogov S.A. // Optical Memory & Neural Networks. 2016. V. 25. P. 114-117.

Т.З. МИНИХАНОВ, Е.Ю. ЗЛОКАЗОВ, В.В. КРАСНОВ,
Д.Д. ДЕРЕВЕНИЦКАЯ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ МОДУЛЯЦИИ ФАЗЫ ЖК ПВМС HoloEye PLUTO 2 VIS-016

Была измерена временная динамика модуляции фазы жидкокристаллического фазового пространственно-временного модулятора света HoloEye PLUTO 2 VIS-016. Был проведён эксперимент, по результатам которого были определены временные характеристики отклика модулятора – длительности переднего и заднего фронтов, равные 147,4 и 96,9 мс соответственно.

T.Z. MINIKHANOV, E.Yu. ZLOKAZOV, V.V. KRASNOV,
D.D. DEREVENICKAIA

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

MEASUREMENT OF TIME DYNAMICS OF PHASE MODULATION OF THE LC SLM HoloEye PLUTO 2 VIS-016

We measured time dynamics of phase modulation of the liquid crystal spatial light modulators “HoloEye PLUTO 2 VIS-016”. The experiment for measuring time characteristics of SLM’s response, such as lengths of response fronts was carried out.

В настоящее время во многие оптические системы, где необходимо применение дифракционных элементов, активно интегрируются пространственно-временные модуляторы света. Часто требуется скоростная смена кадров на модуляторах, однако реальная скорость обновления может оказаться существенно ниже кадровой частоты. Несмотря на заявленную в документации к устройству частоту обновления кадров, ЖК-модуляторы не способны корректно отображать дифракционные элементы на этой частоте, что может приводить к некорректной работе всей системы.

В документации к ЖК ПВМС указывается время отклика, однако нет указаний, при каких параметрах это значение было получено, поэтому были определены временные характеристики отклика модулятора – длительности переднего и заднего фронтов. На рис. 1 приведена схема установки, собранной для эксперимента. Основными элементами схемы являются: лазер Cobolt Samba 200, генерирующий излучение на длине волны 532 нм, высокоскоростная камера Flare 48M CoaXPress (CXP) и ЖК ПВМС HoloEye PLUTO 2 VIS-016.

Для исследования временной динамики модуляции фазы ЖК ПВМС использовались фазовые бинарные дифракционные оптические элементы (ДОО) без пространственной несущей, которые выводились на экран модулятора с частотой 2 Гц. Восстановленные изображения, зарегистрированные камерой с частотой съёмки в 1 кГц, представляли собой точки с различным смещением относительно центра изображения, по интенсивности которых и определялась временная динамика модуляции. Пример зависимости интенсивности первого порядка дифракции от времени представлен на рис. 2.

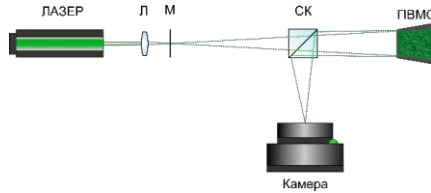


Рис. 1. Схема установки для исследования временной динамики модуляции: Л – линза, М – микроапертура, СК – светоделительный куб, П – поляризатор, ПВМС – пространственно-временной модулятор света

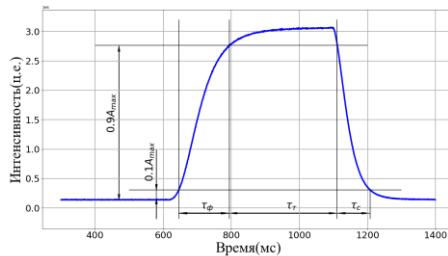


Рис. 2. Зависимость интенсивности первого порядка дифракции от времени

В результате проведённых измерений времен между уровнями значений интенсивности 10 и 90 % от максимальной величины, получены значения длительностей передних и задних фронтов отклика ЖК ПВМС, которые составили $147,4 \pm 1,1$ и $96,9 \pm 0,3$ мс соответственно. При этом в документации к ПВМС указываются длительности фронтов 56 и 65 мс, соответствующие глубине модуляции 2π на длине волны 633 нм. Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что максимальная частота, с которой можно выводить ДОО на модуляторе составляет не более 3 Гц, что в 20 раз меньше кадровой частоты.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 21-79-00117.

Д.Д. ДЕРЕВЕНИЦКАЯ, В.В. КРАСНОВ, Е.Ю. ЗЛОКАЗОВ,
Т.З. МИНИХАНОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ОПТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ФАЗОВЫХ БИНАРНЫХ ДИРФАКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ БЕЗ НЕСУЩЕЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЧАСТОТЫ

Предложен метод оптического синтеза фазовых бинарных дифракционных оптических элементов (ДОЭ), формирующих единственный сфокусированный порядок дифракции. По результатам оптических экспериментов улучшение оптического качества восстановленных с ДОЭ изображений достигает 22 %.

D.D. DEREVENITSKAIA, V.V. KRASNOV, E.Yu. ZLOKAZOV,
T.Z. MINIHANOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

OPTICAL SYNTHESIS OF PHASE DIFFRACTION OPTICAL ELEMENTS WITHOUT CARRIER SPATIAL FREQUENCY

An algorithm for optical synthesis of binary diffractive phase elements is presented. The illuminated diffractive elements form a single diffraction order. By experiments, the improvement of optical quality of reconstructed images is verified. The normalized standard deviation (NSTD) value was decreased by 22 %.

Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) используются во многих областях науки и техники. Часто используемыми ДОЭ являются голограммы. При восстановлении обычной голограммы возникают три порядка дифракции, которые необходимо пространственно разделять. Существуют элементы, лишённые недостатков обычных голограмм – киноформы. Это полностью фазовые элементы, которые формируют единственный порядок дифракции. Разработанный метод синтеза фазовых бинарных ДОЭ позволяет формировать единственный порядок дифракции подобно киноформе.

Метод состоит из двух этапов. Первый осуществляется итерационным алгоритмом, подобным алгоритму Герчберга-Сэкстона. Второй этап нацелен на снижение ошибки синтеза по результатам первого этапа и включает применение метода прямого поиска со случайной траекторией. В данной работе первый этап синтеза проводился численно на компьютере, а второй этап синтеза – оптически. Вначале генерируется

случайная траектория обхода. Затем в соответствии с траекторией меняется один элемент ДОО. Получившийся ДОО выводится на пространственно-временной модулятор света. Восстановленное изображение регистрируется камерой и вычисляется целевая функция. Если значение целевой функции снизилось, то изменение сохраняется, а если нет – возвращается исходный вариант. Схема экспериментальной установки изображена на рис. 1.

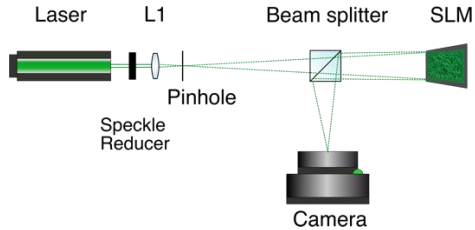


Рис. 1. Схема установки для оптического синтеза

В эксперименте использовались изображения размером 64×64 отсчётов («present» и «smile»). Изображения помещались по центру области восстановления размером 128×128 отсчётов. Синтез ДОО производился с использованием двух градаций фазы. Размер ДОО составил 128×128 отсчётов. Для того чтобы получить единственный сфокусированный порядок дифракции, данные ДОО должны освещаться расходящейся волной определённого радиуса кривизны. Пример восстановленных изображений после первой фазы, соответствующие им ДОО после оптической фазы синтеза и восстановленные с них изображения представлены на рис. 2. После первой фазы значение НСКО составило 0,74, а после оптического синтеза – 0,67 для «present». Для «smile» после первой фазы НСКО – 0,65, а после второй – 0,51.

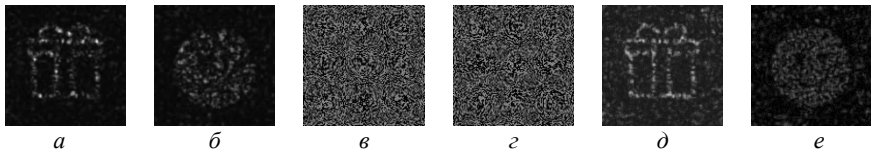


Рис. 2. Восстановленные изображения после первого этапа синтеза (а, б); оптически синтезированные ДОО (в, г); восстановленные изображения после второго этапа (д, е)

Эксперимент показал, что предложенный метод синтеза фазовых бинарных ДОО без несущей пространственной частоты позволяет повысить оптическое качество восстановленного изображения до 22 %.

Д.Ю. ХАРИТОНОВ, Э.Р. МУСЛИМОВ

*Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ***МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОЛОГРАММНОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ
РЕШЁТКИ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ**

Рассмотрены программные инструменты для моделирования голограммной решётки, записанной со вспомогательным зеркалом. На примере дополнительного спектрального канала показан выигрыш до 6,9 раз в коррекции аберраций.

D.Yu. KHARITONOV¹, E.R. MUSLIMOV*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI*

Software tools for modelling of a holographic grating recorded with an auxiliary mirror are considered. An advantage in aberration correction up to 6.9 times is shown on an example of additional spectral channel.

**MODELING OF A SECOND GENERATION
HOLOGRAPHIC GRATING**

Голографические решётки нашли широкое применение в спектральных приборах благодаря возможности коррекции аберраций и подстройки дифракционной эффективности. В [1] предложено расширить их коррекционные возможности за счёт формирования композитного элемента, состоящего из нескольких независимо оптимизируемых элементарных полей. Однако для моделирования такого элемента необходимы дополнительные программные инструменты, разработка которых является целью данной работы.

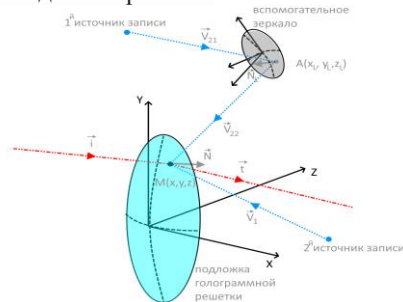


Рис. 1. Схема записи голограммной решётки с дополнительным зеркалом

Рассмотрим схему записи и работы голограммной решётки, записанной с помощью вспомогательного зеркала (рис. 1), классифицируемой как решётка второго поколения [2]. Дифракция в произвольной точке решётки описывается уравнением Уэлфорда [3]. Для трассировки лучей в схеме записи необходимо решить систему нелинейных уравнений. В данном случае задачу удаётся свести к минимизации скалярной функции ошибок с помощью симплексного алгоритма Нельдера-Мида [4]. Разрабатывается библиотека C++ (dll) в среде MS Visual Studio, позволяющая создать пользовательский тип поверхности для Zemax OS и встроить указанные вычисления в существующие методы моделирования оптических систем.

В качестве контрольного примера рассматривается схема дополнительного канала спектрографа [5] с пропускающей объёмно-фазовой решёткой для диапазона 400 - 560 нм (рис. 2). Спектрограф работает с относительным отверстием 1:7 и обратной линейной дисперсией 13,3 нм/мм. Показано, что введение в схему записи вспомогательного зеркала радиусом 31,5 мм под углом 57,27 ° позволит уменьшить размер пятен рассеяния в 1,8 - 6,9 раз (рис. 3)

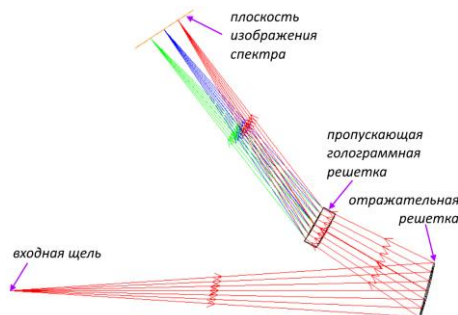


Рис. 2. Принципиальная схема двухканального спектрографа

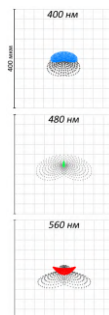


Рис. 3. Точечные диаграммы

Разработанные инструменты будут использованы для моделирования и оптимизации аберраций и дифракционной эффективности композитных голограмм.

Список литературы

1. Muslimov E.R., et al. // Photonics. 2020. V. 14 (7). P. 1-14.
2. Павлычева Н.К. // Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. 2003.
3. Welford W.A. // Optics communications. 1975. V. 14. P. 322-323.
4. Lagarias J.C., et al. // SIAM J. of Optimization. 1998. V. 9(1). P. 112-147.
5. Pavlycheva N.K. // Advanced Optical Technologies. 2012. V. 1(6). P. 455-461.

Ю.Х. ИСМАНОВ¹, Т.Д. ТЫНЫШОВА

*Кыргызский государственный университет строительства, транспорта
и архитектуры им. Н. Исанова, Бишкек*

¹Институт физики НАН Кыргызской республики, Бишкек

ВЛИЯНИЕ ФАЗОВОГО ОБЪЕКТА С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ ПОКАЗАТЕЛЕМ ПРЕЛОМЛЕНИЯ НА ПОЛОЖЕНИЕ ПЛОСКОСТЕЙ САМОРЕПРОДУКЦИИ РЕШЁТКИ

Рассмотрено влияние фазовой неоднородности, показатель преломления которой линейно изменяется вдоль направления нормального направлению оптической оси, вдоль оси X . Показано, что объект, характеризующийся линейным изменением показателя преломления вдоль направления нормального оптической оси, приводит к увеличению расстояния между плоскостями самовоспроизведения. Кроме того происходит смещение этих плоскостей в направлении оптической оси.

Yu.Kh. ISMANOV¹, T.D. TYNYSHOVA

*Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture
named after N. Isanov, Bishkek*

¹Institute of Physics of NAS of Kyrgyz republic, Bishkek

INFLUENCE OF A PHASE OBJECT WITH A CHANGING REFRACTIVE INDEX ON THE POSITION OF THE GRATING SELF-REPRODUCTION PLANES

The influence of the phase inhomogeneity, the refractive index of which changes linearly along the direction normal to the direction of the optical axis, along the X axis is considered. It is shown that an object characterized by a linear change in the refractive index along the direction of the normal optical axis leads to an increase in the distance between the self-reproduction planes. In addition, these planes are displaced in the direction of the optical axis.

Рассмотрим оптическую неоднородность достаточно сложного вида. Такой неоднородностью может быть фазовая среда, показатель преломления которой линейно изменяется вдоль направления нормального направлению оптической оси, вдоль оси X : $n_v = n_{v0}(1 + x/xm)$. В данном случае $2xm$ – это поперечная ширина рассматриваемой фазовой среды, то есть вдоль оси X среда тянется от координаты $-xm$ до координаты $+xm$. Деформации фазы волны, возникающие под действием этой среды, можно записать в виде

$$f_p = \frac{2\pi}{\lambda} (1 + x/xm) n_{v0} \Delta s. \quad (1)$$

Здесь λ – длина волны, Δs – толщина фазовой среды.

Соотношение, описывающее световое поле, прошедшее сквозь решётку [1-3] и рассматриваемый фазовый объект [4-6], на произвольном расстоянии z от плоскости фазового объекта имеет вид

$$U_v(x, y, z) = 1/4 \exp[ik(z + n_v \Delta s)] \sum_{-T}^T b_m \exp[i2\pi(\frac{m}{d1}x - \frac{m^2 \lambda}{2\sigma^2} z1)] \times \\ \times \{\Phi[\sqrt{\frac{\pi}{\lambda z}}(a - y)] - \Phi[\sqrt{\frac{\pi}{\lambda z}}(-a - y)]\} \{\Phi[\sqrt{\frac{\pi}{\lambda z}}(a - (\frac{n_{v0} \Delta s z}{xm} + \frac{m \lambda z}{\sigma} - x))] - \\ - \Phi[\sqrt{\frac{\pi}{\lambda z}}(-a - (\frac{n_{v0} \Delta s z}{xm} + \frac{m \lambda z}{\sigma} - x))]\}. \quad (2)$$

$$\text{Здесь } d1 = \frac{1}{\frac{1}{\sigma} + \frac{n_{v0} \Delta s}{\lambda xm \cdot m}}, z1 = (1 + \frac{n_{v0}^2 \Delta s^2 \sigma^2}{\lambda^2 xm^2 m^2} + \frac{2n_{v0} \Delta s \sigma}{xm \cdot m \lambda})z. \quad (3)$$

Согласно (3), оптическая неоднородность, характеризующаяся линейным изменением показателя преломления вдоль направления нормального оптической оси $n = n_0(1 + x/x_m)$, приводит к увеличению расстояния между плоскостями самовоспроизведения. Кроме того происходит смещение этих плоскостей в направлении оси Z . Положения плоскостей самовоспроизведения в этом случае выражаются отношением

$$z = \frac{K}{(\frac{n_{v0} \Delta s}{\sqrt{2} \lambda xm} + \frac{m}{\sigma} \sqrt{\frac{\lambda}{2}})^2}. \quad (4)$$

Здесь $K=0, 1, 2, \dots$

Список литературы

1. Maripov A., Ismanov Y. Interferometer based on the Talbot effect in holography // J. Optics (Paris). 1995. V. 26. No. 1. P. 25-28.
2. Жумалиев К.М., Алымкулов С.А., Исманов Ю.Х., Исмаилов Д.А. Анализ голографических интерферограмм // Изв. КГТУ им. И. Раззакова. 2016. № 3(39). Ч. I. С. 56-60.
3. Исманов Ю.Х., Тынышова Т.Д. Уменьшение объёма вводимых данных при компьютерной обработке интерферограмм // Материалы VIII Международной конференции по фотонике и информационной оптике: сбор. науч. тр. М.: НИЯУ МИФИ, 2019. С. 695-696.
4. Исманов Ю.Х., Алымкулов С.А. Саморепродуцирование регулярных объектов с ограниченной апертурой // Наука, новые технол. и инновации Кыргызстана. 2015. № 7. С. 3-5.
5. Исманов Ю.Х. Восстановление изображения волнами различной длины // Известия Национальной Академии наук Кыргызской Республики. 2015. № 4. С. 30-33.
6. Исманов Ю.Х., Тынышова Т.Д., Алымкулов С.А. Использование приближения Френеля для расчёта распределения светового поля, прошедшего сквозь решётку // Вестник КГУСТА. 2017. № 3(57). С. 171-178.

Н.Т. АВЛАСЕВИЧ, А.М. ЛЯЛИКОВ

Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Беларусь

ФОРМИРОВАНИЕ ГОЛОГРАММ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР В НЕКОГЕРЕНТНОМ СВЕТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПОРНЫХ РЕШЁТОК

Впервые теоретически обоснована возможность записи голограмм периодических структур в некогерентном свете с реализацией произвольной регулировки вектора решётки структуры, формируемой голограммы. Запись голограмм периодических структур позволяет реализовать многоэкспозиционный метод голографической интерферометрии с возможностью восстановления высококачественных интерферограмм в полосах конечной ширины, что значительно расширяет возможности голографической интерферометрии.

N.T. AVLASEVICH, A.M. LYALIKOV

Janka Kupala Grodno State University, Belarus

FORMATION OF HOLOGRAMS OF PERIODIC STRUCTURES IN INCOHERENT LIGHT USING SUPPORT GRATINGS

For the first time, the possibility of recording holograms of periodic structures in incoherent light with the implementation of arbitrary adjustment of the lattice vector of the structure of the formed hologram is theoretically substantiated. Recording of holograms of periodic structures makes it possible to implement a multi-exposure method of holographic interferometry with the possibility of restoring high-quality interferograms in bands of finite width, which significantly expands the possibilities of holographic interferometry.

Впервые теоретически обоснована возможность записи голограмм периодических структур в некогерентном свете с реализацией произвольной регулировки вектора решётки структуры, формируемой голограммы.

Сущность способа записи голограмм заключается в использовании при формировании голограммы периодической структуры дополнительной опорной решётки, установленной перед исследуемой периодической структурой в оптически сопряжённой плоскости. Предложена оптическая схема устройства для реализации способа записи голограмм периодических структур с использованием опорной дифракционной решётки.

Установлена зависимость и получено уравнение зависимости величины R_G модуля вектора решётки формируемой голографической структуры от угла φ его наклона к оси полярной системы координат и от соотношений R/X_S модулей векторов R опорной решётки и X_S исследуемой периодической структуры:

$$R_G^2 - 4R_G X_S \cos \varphi + (2X_S)^2 = (2R)^2.$$

Установлена закономерность поведения конца вектора решётки формируемой голографической структуры: конец данного вектора всегда описывает окружность не зависимо от соотношения R/X_S .

Установлено, что для обеспечения возможности регулировки вектора R_G диапазоне от 0 до 2π , необходимо выбирать опорную дифракционную решётку для которой $R/X_S < 1$.

На рис. 1 представлены графики зависимости величины R_G вектора решётки формируемой голографической структуры от соотношения векторов $C = R/X_S$ решётки исследуемой структуры и R опорной решётки.

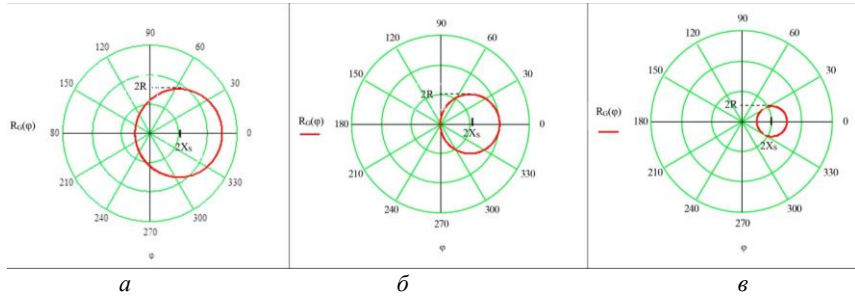


Рис. 1. Графики зависимости величины R_G от C : $C = 1,5$ (а), $C = 1$ (б), $C = 0,5$ (в)

Такая запись голограмм периодических структур позволяет реализовать многоэкспозиционный метод голографической интерферометрии с возможностью восстановления высококачественных интерферограмм в полосах конечной ширины, что значительно расширяет возможности голографической интерферометрии.

Ю.Х. ИСМАНОВ, Н.К. ДЖАМАНКЫЗОВ, С.А. АЛЫМКУЛОВ
Институт физики НАН Кыргызской республики, Бишкек

ОСОБЕННОСТИ ЗАПИСИ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ГОЛОГРАММЫ-РЕШЁТКИ

Проведён теоретический анализ особенностей записи и восстановления голограммы решётки. Показано, что в такой голограмме восстанавливаются как сама решётка, так и последовательности её саморепродукций.

Yu.Kh. ISMANOV, N.K. DZHAMANKYZOV, S.A. ALYMKULOV
Institute of Physics of NAS of Kyrgyz republic, Bishkek

FEATURES OF RECORDING AND RESTORATION OF THE GRATING HOLOGRAM

A theoretical analysis of the features of recording and reconstruction of the grating hologram is carried out. It is shown that both the lattice itself and the sequences of its self-reproduction are restored in such a hologram.

При записи решётки её плоскость (x_0, y_0) удалена на расстояние z_1 от параллельно расположенной плоскости фотопластинки (x, y) . Причём запись осуществляется при помощи двух опорных волн – соосной предметной и составляющей угол φ с объектной волной $R = A \exp(ikz)$. Если осветить данную голограмму опорной волной, которая использовалась при записи, то она восстанавливает за голограммой три луча, представляющих собой дифракционные порядки, направление которых определяется значением угла φ между лучами распространения опорной и объектной волн [1 - 4] (рис. 1).

Результаты анализа процесса восстановления голограммы-решётки показали, что необходимо рассматривать в качестве восстанавливаемого изображения, как сам исходный объект, так и последовательность его саморепродукций. Такой подход позволяет выявить при восстановлении голограммы не только действительное и мнимое изображения исходного объекта, но и последовательности их саморепродукций в ± 1 порядках дифракции [5 - 7]. Кроме того в этом случае в обоих порядках дифракции объекты захватывают как мнимое, так и действительное области пространства, то есть деление на мнимое и действительное изображения теряет смысл. Оба изображения можно видеть одновременно в обоих

Н.Т. АВЛАСЕВИЧ, А.М. ЛЯЛИКОВ

Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Беларусь

**УСТРОЙСТВО ЗАПИСИ ГОЛОГРАММ
ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР
В ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕКОГЕРЕНТНОМ СВЕТЕ
С ПРОИЗВОЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ ПОЛОС СТРУКТУРЫ**

Голографическая интерферометрия периодических структур – высокочувствительный метод изучения структурированных объектов. Предложена оптическая схема устройства для реализации записи голограмм периодических структур одним пучком некогерентного света с возможностью произвольного регулирования величины и направления вектора решётки формируемой голографической структуры.

N.T. AVLASEVICH, A.M. LYALIKOV

Janka Kupala Grodno State University, Belarus

**DEVICE FOR RECORDING HOLOGRAMS OF PERIODIC
STRUCTURES IN INCOHERENT LIGHT WITH ARBITRARY
ORIENTATION OF STRUCTURE BANDS**

Holographic interferometry of periodic structures is a highly sensitive method for studying structured objects. An optical scheme of a device for recording holograms of periodic structures with a single beam of incoherent light with the possibility of arbitrary adjustment of the magnitude and direction of the lattice vector of the formed holographic structure is proposed.

К высокочувствительному методу изучения структурированных объектов относится голографическая интерферометрия периодических структур [1], заключающаяся в формировании голограммы структуры с последующим восстановлением интерференционной картины. Запись голограммы структурированного объекта может быть осуществлена как в когерентном, так и некогерентном освещении [2]. Установлено, что при использовании пространственно некогерентного освещения качество голограмм значительно выше, чем при записи в когерентном свете, но недостаток – это сложность регулирования вектора решётки записываемой голографической структуры.

На рис. 1 приведена оптическая схема устройства для реализации записи голограмм периодических структур одним пучком некогерентного света с возможностью произвольного регулирования величины и

направления вектора решётки формируемой голографической структуры. С помощью некогерентного источника света 1 и оптической системы, выполненной, например, в виде телескопа, образованного рассеивающей 2 и собирающей 3 линзами формируют коллимированный световой пучок и освещают им прозрачную дифракционную решётку 10, которая установлена в оптический держатель 11. На выходе прозрачной 10 дифракционной решётки формируется система дифрагированных световых пучков, расположенных в плоскости, перпендикулярной штрихам решётки. Разворот плоскости, в которой сформирована система дифрагированных пучков, осуществляется разворотом прозрачной 10 дифракционной решётки посредством оптического держателя 11.

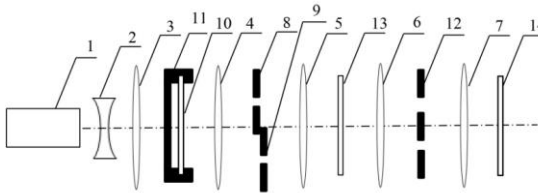


Рис. 1. Оптическая схема устройства записи голограмм

Световые пучки первым 4 объективом фокусируются в плоскости первого 8 и второго 9 экранов первой оптической фильтрующей системы. Разворотом прозрачной 10 дифракционной решётки и отверстиями первого 8 и второго 9 экранов за счёт их перемещения в плоскости, перпендикулярной оптической оси устройства, выбирается пара световых пучков, которые коллимируются вторым 5 объективом и освещают исследуемую 13 периодическую структуру. Таким образом, образуется пара взаимно когерентных световых пучков с возможностью произвольного регулирования направления их распространения. Посредством данной пары световых пучков освещают исследуемую 13 периодическую структуру. В задней фокальной плоскости третьего объектива 6 парой отверстий в экране 12 выделяют два световых пучка, дифрагированных на исследуемой структуре, например, в +1-й и -1-й порядки. Выделенные световые пучки коллимируют четвёртым 7 объективом, и на регистраторе 14 записывают голограмму исследуемой 13 периодической структуры.

Список литературы

1. Ляликов А.М., Авласевич Н.Т. // Оптический журнал. 2019. Т. 86. № 3. С. 56-60.
2. Ляликов А.М., Авласевич Н.Т. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер 2. Матэматыка. 2020. Т. 10. № 1. С. 75-82.

Н.М. ГАНЖЕРЛИ, С.Н. ГУЛЯЕВ¹, И.А. МАУРЕР

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург
¹*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ РЕШЁТКИ НА БИХРОМИРОВАННОМ ЖЕЛАТИНЕ

Представлены варианты изготовления высокочастотных рельефно-фазовых голографических решёток с пространственной частотой не менее 1500 мм^{-1} на слоях бихромированного желатина, в том числе на фотоматериале ПФГ-04 производства ОАО «Компания Славич» (г. Переславль-Залесский). Основой технологии является исключение длительных водных процедур после облучения коротковолновым УФ-излучением зарегистрированных He-Cd лазером образцов решёток. Лучшие рельефно-фазовые голографические решётки с высокой дифракционной эффективностью вплоть до 67 % получены при обработке растворами ледяной уксусной кислоты в изопропиловом спирте.

N.M. GANZHERLI, S.N. GULYAEV¹, I.A. MAURER

Ioffe Institute of the RAS, Saint-Petersburg
¹*Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University*

HIGH-FREQUENCY HOLOGRAPHIC GRATINGS ON DICHROMATED GELATIN

The variants of manufacturing high-frequency relief-phase holographic gratings with a spatial frequency of at least 1500 mm^{-1} on layers of dichromated gelatin, including on the photo material PFG-04 produced by JSC "Company Slavich" (Pereslavl-Zalessky) are presented. The basis of the technology is the exclusion of long-term water procedures after irradiation with short-wave UV radiation of He-Cd laser-registered samples. The best relief-phase holographic gratings with high diffraction efficiency up to 67 % were obtained when treated with solutions of glacial acetic acid in isopropanol.

Для получения голографических решёток с высокой пространственной частотой от 1500 мм^{-1} на фотоматериалах на основе бихромированного желатина (БХЖ) с использованием деструктивного воздействия на слои коротковолнового УФ-излучением ($\lambda < 270 \text{ нм}$) [1] необходимо усовершенствование стандартной методики обработки желатина, чтобы уменьшить влияние сил поверхностного натяжения во влажном слое БХЖ, сглаживающих поверхностный рельеф. Разработан ряд технологий обработки образцов после облучения коротковолновым УФ-излучением,

исключающих как длительные водные процедуры, приводящие к набуханию желатина [2], так и водную обработку вообще, заменённую термообработкой образцов [3]. Это позволило получить рельефно-фазовые голографические решётки с пространственной частотой 1500 мм^{-1} и высокой дифракционной эффективностью (ДЭ), превышающей 50 % [2]. Следующим шагом усовершенствования технологии обработки стало замена водной процедуры травящим воздействием ледяной уксусной кислоты или её растворов в изопропиловом спирте [4, 5]. В результате были получены самые высокие значения ДЭ решёток с пространственной частотой 1600 мм^{-1} . Достигнутые значения максимальной ДЭ (67 %) (рис. 1б) превосходят лучшие результаты, полученные в экспериментах с укороченной по времени до 10 с водной обработкой (55 %) (рис. 1а).

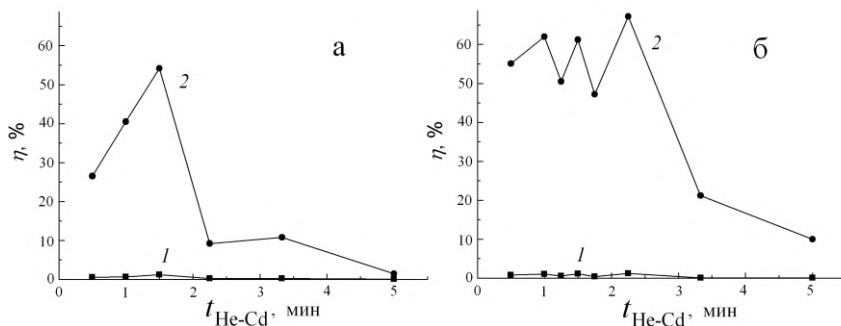


Рис. 1. Зависимость ДЭ решёток от времени экспонирования образцов излучением He-Cd лазера на фотоматериале ПФГ-04 в случае, когда травящий реагент – вода (а), травящий реагент – раствор 50 % ледяной уксусной кислоты + 50 % изопропилового спирта (б): 1 – ДЭ после облучения УФ-излучением до обработки; 2 – ДЭ после обработки

Результаты эффективного использования усовершенствованных методик обработки будут способствовать расширению области применения фотоматериалов на основе БХЖ для создания высокочастотных рельефных голографических структур.

Список литературы

1. Гуляев С.Н., Ратушный В.П. // Оптический журнал. 2003. Т. 70. № 2. С. 45.
2. Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н. и др. // Автометрия. 2020. Т. 56. № 12. С. 92-99.
3. Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н. и др. // Оптика и спектр. 2020. Т. 128. № 10. С. 1507-1511.
4. Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н. и др. // Оптика и спектр. 2021. Т. 129. № 10. С. 1276-1279.
5. Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н. и др. // Письма в ЖТФ. 2021. Т. 47. № 21. С. 13-15.

В.В. МОГИЛЬНЫЙ¹, А.И. СТАНКЕВИЧ¹, Э.А. ХРАМЦОВ^{1,2},
А.П. ШКАДАРЕВИЧ²

¹Белорусский государственный университет, Минск

²Научно-технический центр «ЛЭМТ» БелОМО, Минск, Беларусь

ФОТОРЕФРАКТИВНЫЙ И РЕЛЬЕФООБРАЗУЮЩИЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

Экспериментально исследованы свойства фоточувствительного полимерного материала для записи объёмных фазовых и рельефных голограмм на основе реакций фотоокисления и фотодимеризации боковых антраценовых групп. Показана возможность голографического формирования решёток показателя преломления с амплитудой модуляции $\sim 0,01$ в объёме слоя и поверхностных рельефных решёток с амплитудой в десятки доли микрона. Первые образуются благодаря уменьшенным коэффициентам рефракции продуктов фотореакций, вторые имеют деформационную природу и являются следствием релаксации фотоиндуцированных механических напряжений.

U.V. MAHILNY¹, A.I. STANKEVICH¹, E.A. KHRAMTSOU^{1,2},
A.P. SHKADAREVICH²

¹Belarusian State University, Minsk

²Scientific and Technical Centre «LEMT» of the BelOMO, Minsk, Belarus

PHOTOREFRACTIVE AND RELIEF-FORMING HOLOGRAPHIC MATERIAL

The properties of a photosensitive polymer material for recording volumetric phase and relief holograms based on the reactions of photooxidation and photodimerization of side anthracene groups of polymer chains have been experimentally investigated. The possibility of holographic formation of refractive index gratings with modulation amplitude ~ 0.01 in the layer volume and surface relief gratings with an amplitude of tenths of a micron is shown. The former are formed due to the reduced coefficients of refraction of the products of photoreactions, the latter are of a deformation nature and are a consequence of the relaxation of photoinduced mechanical stresses.

В работе рассмотрены новые свойства полимерного голографического материала с фоточувствительными антраценовыми структурами в боковой цепи макромолекул [1]. Это многократно ослабляет их тепловое движение, а также движение продуктов двух основных фотореакций – фотоокисления и фотодимеризации, способных формировать в объёме фазовые изображения. Материал проницаем для кислорода воздуха, что

позволяет проводить эффективное фотоокисление в объёме слоёв толщиной около 10 мкм за счёт диффузии атмосферного кислорода при добавлении в качестве фотосенсибилизатора метиленового синего. При однородном облучении в спектральном диапазоне 630 - 640 нм изменение показателя преломления достигало величины – 0,02, что позволило лазерным излучением с $\lambda = 633$ нм записывать голографические решётки с предельной дифракционной эффективностью до 10 %. Её дальнейшему увеличению препятствует ограниченная скорость поступления кислорода в слой из воздуха. Получение объёмных голограмм с большей дифракционной эффективностью можно связать с реакцией фотодимеризации при прямом возбуждении антраценовых фрагментов светом с $\lambda < 425$ нм. Измерение с помощью волноводной методики показателя преломления слоёв материала без фотосенсибилизатора, облучённых светодиодом с $\lambda_{\text{max}} = 398$ нм, показало, что и фотодимеризация может уменьшить показатель преломления на 0,02 для $\lambda = 633$ нм. Отсутствие ограничений по толщине слоя позволяет рассчитывать при коротковолновом экспонировании на дифракционные эффективности, существенно превышающие 10 %.

На поверхности исследованных слоёв при записи периодических распределений интенсивности возникал рельеф, который усиливался после термообработки, но его высота не превышала 0,3 - 0,4 % толщины слоя. Фоторельеф свидетельствовал о фотоиндуцированных механических напряжениях, связанных, вероятно, с увеличенным молекулярным объёмом продуктов фотоокисления и фотодимеризации и релаксацией локальных механических напряжений вокруг них путём увеличения удельного объёма материала. Такая деформация подобна холодному течению полимерного стекла. Для её развития необходимо, чтобы напряжения превышали пороговую величину. Процесс останавливается, когда порог достигается в ходе деформационной релаксации. Можно рассчитывать на продолжение процесса, если тем или иным способом увеличить пластичность среды. Вероятно, это нам удалось сделать, помещая слой в углеводородный растворитель, вызывающий набухание материала, но не его растворение. В результате, на поверхности слоёв толщиной 0,5 - 1 мкм удалось сформировать рельефные решётки высотой 10 - 20 % толщины на основе как фотоокисления, так и фотодимеризации антраценовых групп.

Список литературы

1. Могильный В.В. и др. // Журнал прикладной спектроскопии. 2021. Т. 88. № 1. С. 159-165.

Н.М. ГАНЖЕРЛИ, С.Н. ГУЛЯЕВ¹, И.А. МАУРЕР, А.В. АРХИПОВ¹

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

НЕСТАНДАРТНЫЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ ФОТОМАТЕРИАЛА ПФГ-04 ДЛЯ ГОЛОГРАФИИ

Приведены результаты экспериментов по регистрации высокочастотных (1600 мм^{-1}) рельефно-фазовых голографических решёток на фотоматериале ПФГ-04 с помощью нестандартной методики обработки, включающей в себя облучение слоя бихромированного желатина коротковолновым УФ-излучением. Достигнуты высокие дифракционные эффективности образцов (67 %).

N.M. GANZHERLI, S.N. GULYAEV¹, I.A. MAURER,
A.V. ARKHIPOV¹

Ioffe Institute of the RAS, Saint-Petersburg

¹Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

NON-STANDARD METHOD OF PROCESSING PHOTOGRAPHIC MATERIAL PFG-04 FOR HOLOGRAPHY

Presents the result of experiments on the formation of high-frequency (1600 mm^{-1}) phase-relief holographic gratings on photomaterial PFG-04 using non-standard processing procedure involved short-wave UV irradiation of the dichromated gelatin (DCG) layer. High values (67 %) of sample diffraction efficiency (DE) have reached.

Фотопластинки ПФГ-04 позволяют регистрировать объёмные фазовые голограммы, обладающие высокими угловой и спектральной селективностью и дифракционной эффективностью (ДЭ). Свойства таких голограмм связаны с выполнением условия Брэгга для структуры, состоящей из вариаций показателя преломления в толщине бихромированного желатина (БХЖ). Ключевой операцией стандартной обработки является быстрое обезвоживание фотопластинок в водных растворах изопропанола с повышающейся концентрацией, что приводит к образованию микропустот в областях минимумов интерференционной картины и изменению показателя преломления по значительной толщине слоя БХЖ. Однако для многих применений когерентной оптики необходимы дифракционные структуры, имеющие сравнительно низкие угловые и спектральные селективности. Этому требованию удовлетворяют тонкие рельефно-фазовые дифракционные структуры с

высокой пространственной частотой. Чтобы получить подобные структуры на фотоматериале ПФГ-04 предлагается «нестандартный» метод обработки, в котором быстрое обезвоживание влажного слоя БХЖ, заменяется избирательным фотолизом поверхностного слоя желатина и удалением разрушенных участков с помощью травителей на основе ледяной уксусной кислоты, либо воды. Таким образом, ключевой операцией новой процедуры обработки является облучение фотопластинок УФ-излучением, позволяющее получить после травления значительную глубину поверхностного рельефа. Сокращение времени травления до 8 - 10 с даёт возможность регистрировать голографические рельефные структуры на высоких пространственных частотах из-за того, что набухание и размягчение нижних слоёв желатина в данном случае сведено к минимуму.

Эффективность предложенной «нестандартной» методики обработки подтверждаются экспериментами по регистрации голографических решёток с пространственной частотой 1600 мм^{-1} . Полученные голографические структуры обладают высокой ДЭ (54 - 67 %), измеренной на пропускание независимо от типа применённого травящего реагента. Рельефно-фазовый характер дифракции света на полученных голограммах подтверждается экспериментальными измерениями угловой селективности. Полуширина брэгговского пика $\approx 2^\circ$ для голограмм, обработанных по стандартной методике, примерно соответствует толщине слоя БХЖ 25 - 30 мкм, сертифицированной производителем для фотопластинок ПФГ-04. При применении для обработки фотопластинок «нестандартной» процедуры обработки она увеличивается более чем на порядок. Наконец, прямые измерения глубины рельефа на атомно-силовом микроскопе Nano DST (Pacific Nanotechnology Inc) дают большие значения глубины рельефа порядка 0,5 мкм, что объясняет высокую ДЭ образцов на пропускание.

Полученные в работе результаты имеют большое практическое значение, поскольку позволяют за счёт применения «нестандартной» методики обработки получить на коммерчески выпускаемом доступном фотоматериале ПФГ-04 столь же высокие результаты, что ранее были достигнуты для аналогичной процедуры обработки на специально политых в лабораторных условиях слоях БХЖ [1, 2].

Список литературы

1. Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н. и др. // Письма в ЖТФ. 2021. Т. 47. № 21. С. 13-15.
2. Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н. и др. // Оптика и спектр. 2021. Т. 129. № 10. С. 1276-1279.

В.О. ДОЛГИРЕВ, С.Н. ШАРАНГОВИЧ

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ФОРМИРОВАНИЯ
МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАННЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ
НЕОДНОРОДНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ СТРУКТУР
В ФОТОПОЛИМЕРИЗУЮЩИХСЯ КОМПОЗИЦИЯХ**

В данной работе экспериментально продемонстрированы искажения вида селективного отклика для последующих записываемых многослойных решёток, вследствие неоднородности их профилей по глубине слоя, обусловленного влиянием фотоиндуцированного поглощения материала на процесс формирования фотонных структур.

V.O. DOLGIREV, S.N. SHARANGOVICH

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

**EXPERIMENTAL RESEARCH OF HOLOGRAPHIC
FORMATION OF MULTIPLEXED MULTILAYER
INHOMOGENEOUS DIFFRACTION STRUCTURES
IN PHOTOPOLYMERIZING COMPOSITIONS**

In this paper, distortions of the type of selective response for subsequent recorded multilayer gratings are experimentally demonstrated due to the inhomogeneity of their profiles in layer depth due to the influence of photoinduced absorption of the material on the formation of the photonic structures.

Как было показано в теоретических исследованиях [1, 2], неоднородность профиля решёток, вызванных фотоиндуцированным поглощением (ФИП) [2] может приводить к искажениям вида селективного отклика одиночных многослойных неоднородных голографических дифракционных структур (МНГДС).

Целью данной работы является экспериментальное исследование голографического формирования мультиплексированных МНГДС в фотополимеризующихся материалах (ФПМ) в условиях ФИП.

На рис. 1 представлены схемы записи и считывания двухслойной голографической дифракционной структуры (ГДС) в ФПМ. Образец состоял из двух ФПМ-плёнок «ГФПМ633.5» производства ООО

«Полимерные голограммы – Новосибирск» с толщиной слоя 45 ± 5 мкм на стеклянной подложке толщиной 1 ± 0.1 мм и защитной плёнке 135 мкм. Толщина однородного промежуточного слоя составляла 270 мкм. Запись осуществлялась на длине волны 633 нм двумя пучками с апертурой 1 мм и мощностью по 0.2 мВт, падающими под углами $\theta_i = \pm 10$ градусов.

Было последовательно записано три голограммы под углами $\psi = -5; 0; 5$ градусов и временем записи $t_1 = 25$ с, $t_2 = 40$ с, $t_3 = 50$ с.

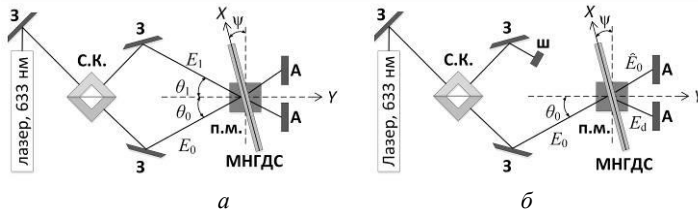


Рис. 1. Схема формирования (а) и считывания (б) мультимплексированной МНГДС

На рис. 2 приведены нормированные зависимости дифракционной эффективности от угла поворота образца для мультимплексированной одиночной и двухслойной ГДС.

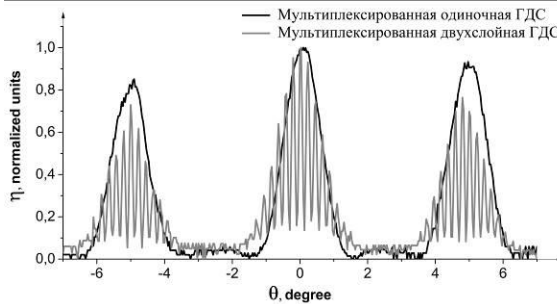


Рис. 2. Селективность мультимплексированной однослойной и двухслойной ГДС

Как видно из рис. 2, минимумы локальных максимумов для двухслойной ГДС не достигают нуля, при этом для последующих голограмм заметно как увеличение данного эффекта, так и наличие небольшого смещения контура селективности. Это подтверждает неоднородность профилей по глубине слоя, вследствие их трансформации под действием ФИП в процессе записи влияние усадки материала.

Список литературы

1. Шарангович С.Н. и др. // Известия вузов. Физика. 2006. Т. 49. № 10. С. 81-89.
2. Дудник Д.И., Шарангович С.Н. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 1. С. 14-21.

А.Ю. БЫКОВСКИЙ, Н.А. ВАСИЛЬЕВ

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

МНОГОЗНАЧНО-ЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДОВЕРИЯ ДЛЯ АГЕНТОВ, УПРАВЛЯЕМЫХ ПО ОПТИЧЕСКОЙ СЕТИ

Квантовые линии распределения ключа в оптических сетях повышают уровень защиты линий передачи данных, но не решают целый ряд сопряжённых проблем, включая задачу взаимной верификации полномочий сетевых аппаратных агентов. Анализ схем верификации, комбинирующих квантовые и классические протоколы, приводит к разработке моделей оценки уровня доверия к агентам на базе дискретной многозначной логики. Такие многопараметрические логические модели упрощают описание поведения агентов и интеграцию квантовых и классических протоколов.

A.Yu. BYKOVSKY, N.A. VASILIEV

Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

MULTIPLE-VALUED LOGIC BASED MODEL OF TRUST FOR AGENTS, CONTROLLED VIA THE OPTICAL NETWORK

QKD lines in optical networks raise the security level for data links, but does not solve many conjugated problems, including mutual verification of credentials for hardware agents. The analysis of verification schemes combining quantum and classical protocols leads to the design of trust models based on discrete multiple-valued logic. Such multi-parametrical logic models simplify the description of agents interaction and the integration of quantum and classical protocols.

Производительность современных коммуникационных сетей на базе ВОЛС и беспроводных каналов передачи данных [1] в настоящее время вполне достаточна для дистанционного управления мультиагентными робототехническими системами в сфере IoT, IoV, производства и медицинского сервиса. В том числе, для интеллектуальных измерительных устройств энергосетей (smart metering power grid) разрабатывают методы взаимных оценок параметров доверия. Однако для автономных мобильных роботов задача оказывается заметно сложнее, и даже квантовые линии здесь не решают ряда проблем защиты информации и взаимной верификации полномочий агентов [2]. Сложность связана с необходимостью применения технологий искусственного интеллекта и гибкой коррекции достаточно сложных процедур обмена разнородными

данными, комбинирующими квантовые ключи, обычные пароли и изображения.

Цель работы заключается в обсуждении возможных схем оценки доверия, встроенных в модель агента в рамках многозначной алгебры Аллена-Живона. Обсуждаются отличия алгебры Аллена-Живона от темпоральной и нечёткой логики, также применяемых в мультиагентных системах.

В качестве модельной задачи рассматривается верификация прохождения роботом заданного маршрута в контрольных точках [2], не обладающих свойствами доверенных узлов (trusted nodes) и использующих данные резервного хранения и оценки уровня доверия сделанные партнерскими узлами с мажоритарной общей оценкой.

Удобство и простота предлагаемой методики заключается в добавлении дополнительных операторов $X_{trej}(Q_j, Q_j)$ в логические минтермы, используемые в объединённом выражении для двух ранее раздельно использованных многозначных логических функций [2] доверенного узла и проверяемого агента $F_{TN}(P, t, V_1, V_2, S_1, S_2, S_3, S_4, J)$ и $F_p(t, \Psi, S_{p1}, S_{p2}, S_{p3}, S_{p4}, J)$, описывающих работу квантового протокола D. Unruh применительно к схеме проверки маршрута. Получаемая в итоге структура минтермов сводится к преобразованиям матричных коэффициентов, а общая логическая функция линейно зависит от числа переменных:

$$F_{vptr} = C1 * X_t(t_1, t_1) * X_p(p, p) * X_{V1}(\dots, \dots) * X_{V2}(\dots, \dots) * \\ * X_{S1}(\dots, \dots) * \dots * X_{S4}(\dots, \dots) * X_{\psi}(\psi, \psi) * \\ * X_{Sp1}(\dots, \dots) * \dots * X_{S4}(\dots, \dots) * X_j(j_1, j_1) * \\ * X_{tre1}(Q_1, Q_1) * \dots * X_{trew}(Q_w, Q_w).$$

Рассматриваемая методика ориентирована на использование схем позиционно-зависимой криптографии, случайного предсказателя и гетерогенной логической модели сетевого агента [2].

Список литературы

1. Bykovsky A.Yu. // J. of Rus. Las.Res. 2021. V. 42(5). P. 618-630.
2. Chi N., Zhou Y., Wei Y., Hu F. // IEEE Vehicular Technology Magazine. 2020. V. 15(4). P. 93-102.

А.В. ПАВЛОВ, А.О. ГАУГЕЛЬ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ПОДХОД К АППРОКСИМАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНЫХ СПЕКТРОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИМЕНительно К СХЕМЕ ГОЛОГРАФИИ ФУРЬЕ

Предложен и обоснован численно-аналитический метод аппроксимации пространственно-частотных спектров изображений с учётом ограниченности динамического диапазона, характерного для обработки методом голографии Фурье. Метод основан на описании спектров амплитуд и их фурье-образов гауссово-подобной моделью. Дана модель аппроксимации функционального коэффициента, связывающего параметры модели спектра и его фурье-образа.

A.V. PAVLOV, A.O. GAUGEL
ITMO University, Saint-Petersburg

ON THE APPROXIMATION OF SPATIAL SPECTRA OF IMAGES UNDER PROCESSING BY FOURIER-HOLOGRAPHY SCHEME

An approach to the approximation of spatial-frequency spectra of images under processing by the Fourier-holography setup is proposed and confirmed numerically. The method takes into account the limitation of the dynamical range as an inherent feature of Fourier-holography and is based on the description of amplitude spectra and their Fourier images by a Gaussian-like model. A model of approximation of the functional coefficient linking the parameters of the spectrum model and its Fourier image is given.

Важный аспект при аппроксимации характеристик обрабатываемой информации, включая изображения, тот, что аналитическое описание должно удовлетворять критериям наглядности и, для компьютерной голографии [1], вычислительной незатратности. Для голографии Фурье основной вопрос в данном контексте – аппроксимация пространственно-частотных спектров амплитуд с учётом нелинейности экспозиционных характеристик голографических регистрирующих сред [2].

Для реальной информации характерны экспоненциальные спектры амплитуд, но при аналитическом описании они дают громоздкие выражения. Компактные и наглядные результаты даёт функция Гаусса, но показатели степени аргумента спектров реальных изображений как правило отличаются от двух – Гауссова модель неадекватна. В работе предложена и подтверждена Гауссово-подобная модель аппроксимации.

Представим экспоненциальный спектр амплитуд следующим образом:

$$S(\nu) = \exp\left(\frac{-\nu^d}{2\nu_{0.606}^d}\right), \quad (1)$$

где ν – пространственная частота, d – показатель степени, $\nu_{0.606}$ – частота, на которой значение спектра 0.606 от максимального. Удобство модели (1) в том, что $\nu_{0.606}$ не зависит от d , а измерение $\nu_{0.606}$ очень просто.

Опишем фурье-образ функции (1) также Гауссово-подобной моделью

$$F(S(\nu)) = F\left(\exp\left(\frac{-\nu^d}{2\nu_{0.606}^d}\right)\right) = \exp\left(\frac{-\zeta^d}{2\zeta_{0.606}^d}\right), \quad (2)$$

и представим параметр $\zeta_{0.606} = K(d, \nu_{0.606}) \cdot \gamma$, где $K(d, \nu_{0.606}) = \frac{\zeta_{0.606}}{\gamma}$ –

функциональный коэффициент связи $\zeta_{0.606}$ с параметром фурье-образа функции Гаусса γ . На рис. 1 показана аппроксимация $K(d, \nu_{0.606})$ функцией

$$K(d) = \ln\left(d + \nu_{0.606} (5\pi)^{-2} + 0.045\right) + 0.307. \quad (3)$$

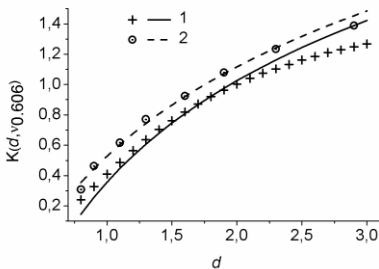


Рис. 1. Зависимости функционального коэффициента $K(d, \nu_{0.606})$ от показателя степени d для значений $\nu_{0.606}$: 1 – $0,5\pi$, 2 – 16π , точки – численные результаты, линии – аппроксимация моделью (3)

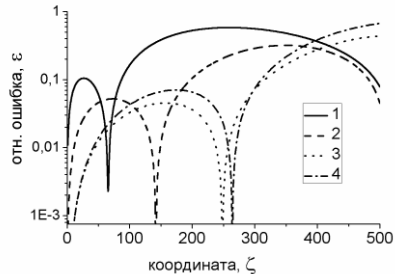


Рис. 2. Зависимости относительной ошибки аппроксимации от координаты в выходной плоскости $4f$ схемы голографии Фурье при $\nu_{0.606} = 0.5$: 1 – $d = 0.9$, 2 – $d = 1.4$, 3 – $d = 2.6$, 4 – $d = 3.0$

Из рис. 1 видно, что ошибка аппроксимации (3) зависит и от $\nu_{0.606}$, и от диапазона d – для $\nu_{0.606} = 16\pi$: при $d \in [0.8, 3]$ СКО $\sigma = 0.033$, а при $d \in [0.9, 2.3]$ $\sigma = 0.015$. На рис. 2 показаны относительные ошибки в выходной плоскости, связанной со спектральной преобразованием Фурье.

Список литературы

1. Евтихийев Н.Н. и др. // Квантовая электроника. 2020. Т. 50 (7). С. 667.
2. Alekseev A.M., et al. // Optics & Spectroscopy. 2010. V. 108(1). P. 137.

Г.И. ГАРНАЕВА, Л.А. НЕФЕДЬЕВ, Э.И. НИЗАМОВА
Казанский (Приволжский) федеральный университет

ЛОГИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ С ИЗОБРАЖЕНИЯМИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭФФЕКТОВ ЗАПИРАНИЯ И СТИРАНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Приведены результаты возможной реализации логических операций для изображений с использованием аккумулярованной эхо-голограммы при наличии внешних пространственно неоднородных электрических полей. Показано, что эффект запирания фотонного эха позволяет осуществлять управление выполнением логических операций и их видом путём варьирования величинами градиентов внешних пространственно неоднородных электрических полей.

G.I. GARNAEVA, L.A. NEFEDIEV, E.I. NIZAMOVA
Kazan Federal University

LOGICAL OPERATIONS WITH IMAGES WHEN USING THE EFFECTS OF LOCKING AND ERASING INFORMATION

The results of a possible implementation of logical operations for images using an accumulated echo-hologram in the presence of external spatially inhomogeneous electric fields are presented. It is shown that the effect of blocking the photon echo makes it possible to control the execution of logical operations and their type by varying the magnitudes of the gradients of external spatially inhomogeneous electric fields.

Оптическая эхо-голография даёт возможность реализации логических операций для изображений. В работе [1] была рассмотрена реализация логических операций над множествами, представленными в виде изображений (пересечение множеств), с помощью стимулированной эхо-голограммы. В работе [2] была рассмотрена реализация операции объединения над множествами, представленных в виде изображений, с помощью режима аккумулятивной долгоживущей эхо-голограммы (АДЭГ). В работе [3] показано, что в зависимости от разности фаз между возбуждающими парами лазерных импульсов в АДЭГ возможно осуществление логических операций объединения множеств, симметрической разности и их суперпозиции.

В данной работе рассмотрена реализация ряда логических операций над изображениями с использованием АДЭГ при наличии разности фаз между парами возбуждающих лазерных импульсов. Для управления

этими операциями наиболее перспективным является эффект «запирания» эхо-голографической информации, что означает создание таких условий, при которых записанная информация не может проявиться (или может частично проявиться) в виде отклика резонансной среды, что может быть осуществлено путём нарушения частотно-временной корреляции неоднородного уширения резонансной линии на различных временных интервалах. Частотно-временная корреляция неоднородно уширенной линии резонансного перехода связана с жёстким соответствием отдельных монокромат линии на различных временных интервалах. Каждая монокромата неоднородно уширенной линии образуется совокупностью атомов (молекул, ионов), находящихся в одинаковых условиях (например, локальные поля в твёрдом теле), но распределённых в объёме образца случайным образом. Процесс формирования откликов фотонного эха состоит из двух основных этапов: расфазирования осциллирующих дипольных моментов оптических центров и последующее их сфазирование, приводящее к возникновению макроскопической поляризации среды, наблюдаемой в виде конкретного отклика. Поэтому даже незначительное нарушение жёсткой частотно-временной корреляции неоднородного уширения должно приводить к значительному ослаблению интенсивности отклика.

Другими словами речь идёт об обратимом разрушении фазовой памяти резонансной среды с возможностью её восстановления. Такого эффекта можно достичь путём воздействия на резонансную среду на различных временных интервалах различными пространственно – неоднородными внешними возмущениями, приводящими к случайным сдвигам или расщеплениям исходных монокромат неоднородно уширенной линии.

Так как отклик АДЭГ является суперпозицией откликов ДФЭ от N пар импульсов (со считывающим импульсом), то вклад в него от каждой пары возбуждающих импульсов становится разным (зависящим от величины градиентов внешних пространственно-неоднородных электрических полей и их взаимной ориентации, а также от разности фаз между парами возбуждающих лазерных импульсов), что даёт возможность управления логическими операциями с использованием АДЭГ.

Список литературы

1. Sakhibieva A.R., Nefed'ev L.A., Garnaeva G.I. // Journal of Applied Spectroscopy. 2017. V. 84. № 3. P. 512-516.
2. Sakhibieva A.R., Nefediev L.A., Nefedyev Y.A., Akhmedshina E.N., Andreev A.O. // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1283. No. 1. P. 012011.
3. Ахмедшина Е.Н., Сахбиева А.Р., Нефедьев Л.А. // Журнал прикладной спектроскопии. 2020. V. 87. № 4. P. 653-657.

Ю.Х. ИСМАНОВ, С.А. АЛЫМКУЛОВ, Н.К. ДЖАМАНКЫЗОВ,
К.М. ЖУМАЛИЕВ

Институт физики НАН Кыргызской республики, Бишкек

ПОТЕРЯ ИНФОРМАЦИИ В ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В работе проведена оценка потерь пространственной информации в системе с голографической записью с учётом как пространственно-частотной, так и апертурной характеристик. Показано, что возможные потери информации в обобщённой голографической системе, если рассматривать её как устройство для передачи пространственной информации, можно объяснить с помощью нескольких причин. Самыми важными являются факторы, определяющие изменение значения величины параметра сигнал/шум при переходе от одного участка голографической системы к другому или при переходе от одного диапазона частот к другому.

Yu.Kh. ISMANOV, S.A. ALYMKULOV, N.K. DZHAMANKYZOV,
K.M. ZHUMALIEV

Institute of Physics of NAS of Kyrgyz republic, Bishkek

LOSS OF INFORMATION IN HOLOGRAPHIC SYSTEMS

The paper evaluates the loss of spatial information in a system with a holographic recording, taking into account both the spatial frequency and the aperture characteristics. It is shown that the possible loss of information in a generalized holographic system, if we consider it as a device for transmitting spatial information, can be explained using several reasons. Among them, the most important are the factors that determine the change in the value of the signal-to-noise parameter when passing from one part of the holographic system to another or when moving from one frequency range to another.

Голографическую запись можно охарактеризовать особенной, присущей только ей передачей информации в области пространственного спектра частот. На общий объём информации, переносимой голографической системой влияют множество факторов, характерных именно для голографического процесса. К этим факторам можно, в первую очередь, отнести факторы, влияющие на полосу пропускания пространственных частот, среди которых можно выделить апертуры входной и выходной частей оптической системы, то есть апертуры линз, используемых для образования картин интерференции, ширины записывающего и опорного пучков, апертуры линз, используемых для восстановления голограммы, размер голограммы или её отдельной страницы. В цифровом случае это ещё и размеры фотоматрицы, которая

записывает оцифрованную голограмму. К факторам, влияющим на итоговый размер записанной информации, относятся также и размеры самого объекта, характеристики полученной голограммы в области пространственных частот и, что очень важно учитывать, характеристики записывающей фотоматрицы [1 - 6]. Рассмотрим влияние ввода данных в голографическую систему на потери пространственной информации. На первом этапе информация может вводиться либо дискретным образом, в виде отдельных пикселей, либо аналоговым образом, в виде непрерывного изображения. И в первом, и во втором случаях возникают ограничения при вводе, обусловленные апертурой системы.

Дискретный ввод информации в голографическую систему изначально ограничивает общий объём информации самим процессом дискретизации – определяется шаг дискретизации, задаются максимальные значения пространственных частот $\nu_{x\max}$ и $\nu_{y\max}$, фиксируются размеры страниц для вводимой информации l_x и l_y . Все это приводит к тому, что информация в процессе ввода передаётся полностью или частично теряется. Если потерь нет, то

$$I = 4l_{x\max}l_{y\max}\nu_{x\max}\nu_{y\max}. \quad (1)$$

В аналоговом случае дискретизация, тем не менее, осуществляется на выходе голографической системы в момент считывания фотоматрицей, причём на шаг дискретизации сильно влияют возможные потери информации на этапах голографической системы. Объём информации, пропускаемый голографической системой, в этом случае равен

$$I = 4l_{x\max}l_{y\max}\nu_{x\max}\nu_{y\max} \log_2[m_0\delta(\nu_{x\max})\delta(\nu_{y\max}) + 1]. \quad (2)$$

Список литературы

1. Жумалиев К.М., Алымкулов С.А., Исманов Ю.Х., Исмаилов Д.А. Анализ голографических интерферограмм // Известия КГТУ им. И. Раззакова. 2016. № 3(39). Ч. I. С. 56-60.
2. Исманов Ю.Х., Тынышова Т.Д. Уменьшение объёма вводимых данных при компьютерной обработке интерферограмм // Материалы VIII Международной конференции по фотонике и информационной оптике: сбор. науч. тр. М.: НИЯУ МИФИ, 2019. С. 695-696.
3. Ismanov Y.Kh., Tynyshova T.D., Aidaraliev Z.K. Wide-range holographic interferometer // Optical Engineering. 2018. V. 57(12). P. 124106.
4. Исманов Ю.Х., Алымкулов С.А. Саморепродуцирование регулярных объектов с ограниченной апертурой // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2015. № 7. С. 3-5.
5. Исманов Ю.Х. Восстановление изображения волнами различной длины // Известия Национальной Академии наук Кыргызской Республик. 2015. № 4. С. 30-33.
6. Исманов Ю.Х., Тынышова Т.Д., Алымкулов С.А. Использование приближения Френеля для расчёта распределения светового поля, прошедшего сквозь решётку // Вестник КГУСТА. 2017. № 3(57). С. 171-178.

Э.И. НИЗАМОВА, Л.А. НЕФЕДЬЕВ, Г.И. ГАРНАЕВА
Казанский (Приволжский) федеральный университет

ПОЛЯРИЗАЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ СИГНАЛАМИ В АККУМУЛИРОВАННОЙ СТИМУЛИРОВАННОЙ ЭХО-ГОЛОГРАММЕ

В работе рассмотрена возможность использования аккумулированной стимулированной эхо-голограммы (АСЭГ) для реализации преобразования и обработки информации, заложенной в лазерные импульсы пар импульсов. Управление эффективностью обработки можно осуществить с помощью поляризационных закономерностей при формировании АСЭГ. Преимуществом такого подхода является одновременное воспроизведение информации заложенной в пары импульсов в отклике АСЭГ, что может значительно ускорить работу фотонного эхо-процессора.

E.I. NIZAMOVA, L.A. NEFEDIEV, G.I. GARNAEVA
Kazan Federal University

POLARIZATION CONTROL OF SIGNALS IN ACCUMULATED STIMULATED ECHO HOLOGRAM

The paper considers the possibility of using an accumulated stimulated echo hologram (ASEH) for the conversion and processing of information embedded in laser pulses of pulse pairs. The processing efficiency can be controlled using polarization regularities in the formation of ASEH. The advantage of this approach is simultaneous reproduction of information embedded in a pair of pulses in the response of the ASEH, which can significantly speed up the operation of the photon echo processor.

При возбуждении аккумулированной стимулированной эхо-голограммы (АСЭГ) – схема её возбуждения представлена на рис. 1 – информация закладывается в лазерные импульсы пар импульсов, один из импульсов пары является объектным, а другой импульс в данной паре импульсов имеет широкий частотный спектр. Во второй паре импульсов первый импульс является объектным (несущим другую информацию), а второй также обладает широким частотным спектром. Управление сигналом отклика можно осуществить с помощью поляризационных закономерностей при формировании АСЭГ.

Поляризационные закономерности генерации АСЭГ в кристалле $\text{LaF}_3 \cdot \text{Pr}^{3+}$ дают возможность использовать сигналы для преобразования информации, заложенной во временной структуре объектных лазерных импульсов. В работах [1, 2] впервые было показано, что, несмотря на то,

что уровни Pr^{3+} в LaF_3 являются простыми синглетами, поляризация и интенсивность отклика стимулированного фотонного эха (СФЭ) зависят от ориентаций поляризаций возбуждающих импульсов. Это связано с различными расположениями ионов Pr^{3+} в элементарной ячейке кристалла LaF_3 относительно направления локальной оси симметрии. В работе [3] было показано, что создание разности фаз между парами возбуждающих импульсов может приводить к уменьшению или к исчезновению частотных модуляций населённости при формировании отклика. Варьирование фаз и поляризаций возбуждающих импульсов даёт возможность управления пространственно-временной структурой отклика АСЭГ, что проиллюстрировано на рис. 2. Таким образом, возможно поляризационное управление временной формой отклика АСЭГ.

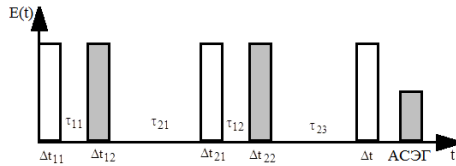


Рис. 1. Последовательность лазерных импульсов при возбуждении АСЭГ

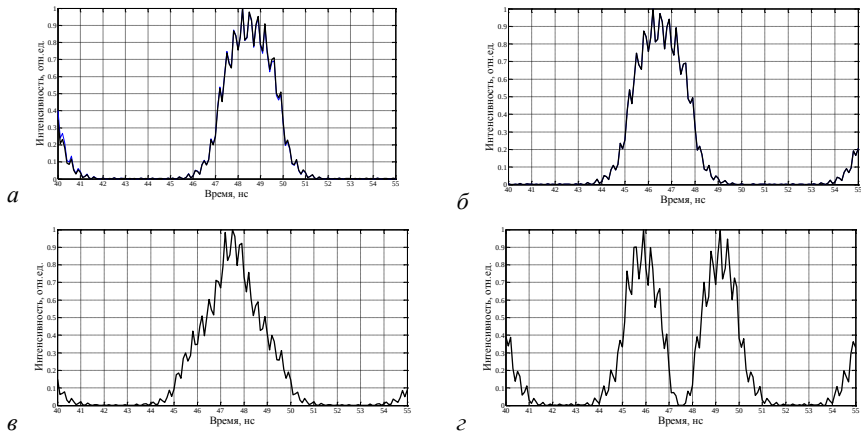


Рис. 2. Интенсивности x и y поляризационных компонент отклика: от первой пары импульсов (a), от второй пары ($б$); интенсивность отклика от всех импульсов в случае фазы второй пары импульсов относительно первой равной 0° ($в$), 180° ($г$)

Список литературы

1. Лисин В.Н. // Письма в ЖЭТФ. 1993. Т. 57. С 402-405.
2. Zuikov V.A., Bikbov I.S., Nefediev L.A., Samartsev V.V. // Las. Phys. 1992. V. 2. P. 747-750.
3. Akhmediev N.N. // Optics Lettets. 1990. V. 15. P. 1035-1037.

А.С. ЕЗЕРСКИЙ, А.О. ГЕОРГИЕВА, А.В. ЧЕРНЫХ,
Н.В. ПЕТРОВ

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

**ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ
НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФАЗЫ
В ЗАДАЧЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА ВОЛНОВОГО
ФРОНТА ПРИ МОДУЛЯЦИИ ЦИФРОВЫМ
МИКРОЗЕРКАЛЬНЫМ УСТРОЙСТВОМ**

Представлена цифровая голографическая схема регистрации на основе геометрической фазовой линзы и поляризационной камеры. Исследуемый волновой фронт модулировался при помощи цифрового микрозеркального устройства.

A.S. EZERSKII, A.O. GEORGIEVA, A.V. CHERNYKH,
N.V. PETROV

ITMO University, Saint-Petersburg

**HOLOGRAPHIC REGISTRATION SYSTEM
BASED ON THE GEOMETRIC PHASE EFFECT
IN CASE OF RESEARCHING QUALITY
OF THE WAVEFRONT DURING MODULATION
WITH A DIGITAL MICROMIRROR DEVICE**

A digital holographic registration scheme based on a geometric phase lens and a polarization camera is presented. The investigated wavefront was modulated using a digital micromirror device.

При помощи цифровой голографии фазового сдвига возможно получать как амплитудные, так и фазовые изображения объекта [1]. Основу таких схем составляют элементы с эффектом геометрической фазы, преобразовывающие исходное излучение, разделяя его на два пучка [2]. При этом, изменяется их поляризация и вносится фазовая задержка. Благодаря регистрации при помощи поляризационной камеры, становится возможным регистрировать одновременно четыре разных распределения интенсивности с различной фазовой задержкой, что позволяет использовать низкокогерентные источники излучения и делает схему устойчивой к вибрациям.

Целью работы является исследование характеристик восстанавливаемого с голограммы изображения, полученного при помощи голографической схемы регистрации на основе эффекта геометрической фазы и поляризационной камеры. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки и восстановленные фазовые распределения. Для модуляции волнового фронта используется адаптивный пространственный модулятор света, состоящий из матрицы микрзеркал, позволяющий синтезировать волновые поля с требуемыми характеристиками. Для создания бинарных паттернов применялся метод компьютерно-генерированной внеосевой голографии Ли [3].

Результаты теоретического и экспериментального исследования показали, что разработанную схему возможно использовать для исследования характеристик волнового фронта. С использованием установки были получены амплитудные и фазовые изображения модулируемых полей. Экспериментальные данные соответствуют результатам численного моделирования.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации № MD-6101.2021.1.2.

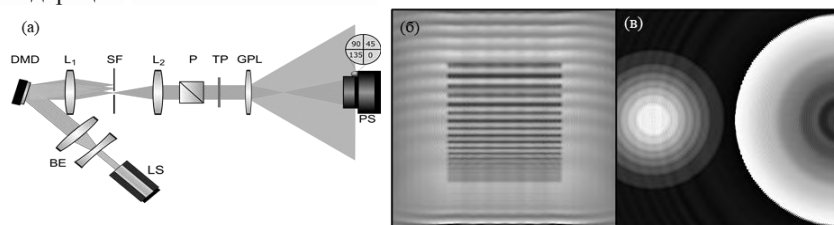


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: BE - расширители пучка, L – линзы, SF – пространственный фильтр, P – призма Глана-Тейлора, TP – плоскость, в которой формируется изображение, GPL – геометрическая фазовая линза, PS – поляризационный матричный фотодетектор (a), восстановленное со смоделированной голограммы фазовое изображение объекта – микрометра (б), восстановленное со смоделированной голограммы фазовое изображение распределения Гаусса (в)

Список литературы

1. Chernykh A.V., Ezerskii A.S., Georgieva A.O., Petrov N.V. Study on object wavefront sensing in parallel phase-shifting camera with geometric phase lens // Proceedings of SPIE. 2021. V. 11898. P. 118980X.
2. Kim J., Li Y., Miskiewicz M.N., Oh C., Kudenov M.W., Escuti M.J. Fabrication of ideal geometric-phase holograms with arbitrary wavefronts // Optica. 2015. V. 2, No. 11, P. 958-964.
3. Lee W.-H. Binary synthetic holograms // Applied Optics, 1974, V. 13, No. 7, P. 1677-1682.

А.С. СВИСТУНОВ, Д.А. РЫМОВ, П.А. ЧЕРЁМХИН,
И.Ю. ЯРОВОЙ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

РЕКОНСТРУКЦИЯ СЕЧЕНИЙ 3D-СЦЕНЫ ИЗ НАБОРА ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ МАШИНЫМ ОБУЧЕНИЕМ

Быстрое и качественное восстановление изображений является одной из важных проблем в цифровой голографии, особенно в случае осевых голограмм, зарегистрированных за одну экспозицию, или, например, при необходимости реконструкции сцен, содержащих несколько плоскостей. В работе предлагается метод восстановления изображений с голограмм 3D-сцен машинным обучением.

A.S. SVISTUNOV, D.A. RYMOV, P.A. CHEREMKHIN,
I.Yu. YAROVY

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

RECONSTRUCTION OF 3D-SCENE SECTION FROM DIGITAL HOLOGRAM BY MACHINE LEARNING

Fast and accurate image reconstruction is important problem in digital holography. For example, cases of single-exposure inline holograms or reconstruction of scenes with multiple object planes require additional processing. A method for 3D-hologram reconstruction using machine learning is proposed.

Методы на основе машинного обучения стали широко применяться в задачах оптической обработки информации, в том числе и в цифровой голографии [1 - 3]. Например, стандартное восстановление изображений в осевой схеме требует записи набора голограмм. В случае же одиночной осевой голограммы качество восстановления существенно снижается из-за пересечения дифракционных порядков с объектом. Восстановление набора сечений 3D-сцены снижает скорость расчётов и имеет ограничения по качеству из-за пересечения изображений отдельных объектов.

В связи с этим предлагается использовать машинное обучение для реконструкции изображений. Это позволяет снизить как влияние нежелательных порядков дифракции, так и объектов из различных сечений [3]. В основе лежит способность нейросетей обучаться на некотором наборе данных и восстанавливать изображения по характерным признакам. Входными данными нейросети были набор голограмм и набор соответствующих им исходных объектов. Схема элементов архитектуры

представлена на рис. 1. Архитектура сети схожа с Y-Net [4]. Сеть содержит два выходных слоя, каждый из которых соответствует одному из изображений объектов, расчёт функции потерь для каждого слоя производился отдельно. Для апробации метода использовался обучающий набор из 30000 голограмм 3D-сцен, состоящих из двух плоских объектов из базы MNIST размером 32×32 отсчёта. На рис. 2 представлены целевые изображения и изображения, восстановленные обученной нейросетью.

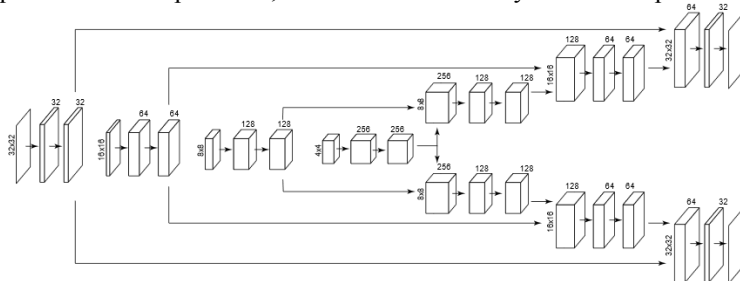


Рис. 1. Схема используемой архитектуры нейросети

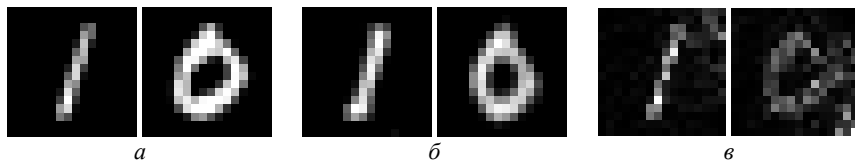


Рис. 2. Изображения: исходные (а), восстановленные машинным обучением (б) и прямым расчётом дифракции с подавлением нулевого порядка дифракции (в)

Как видно, предложенный метод даёт лучшие результаты по качеству восстановления, в том числе по различным метрикам. Например, по индексу структурного сходства преимущество было практически двукратное даже для случая внеосевых голограмм.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 20-79-00291.

Список литературы

1. Javidi B., Carnicer A., Anand A., et al. // Optics Express. 2021. V. 29 (22). P. 35078-35118.
2. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Rodin V.G., Rymov D.A., Starikov R.S. // Procedia Computer Science. 2020. V. 169. P. 440-444.
3. Zeng T., Zhu Y., Lam E.Y. // Optics Express. 2021. V. 29. P. 40572-40593.
4. Wang K., Dou J., Kemao Q., Di J., Zhao J. // Optics Letters. 2019. V. 44. P. 4765.

А.С. ОВЧИННИКОВ, В.В. КРАСНОВ, Е.А. КУРБАТОВА

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ БИНАРИЗАЦИИ АМПЛИТУДНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ БЕЗ НЕСУЩЕЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЧАСТОТЫ

Проведено исследование различных методов бинаризации для амплитудных дифракционных оптических элементов (ДОЭ) без несущей пространственной частоты. По результатам численного и оптического восстановления изображений и дальнейшего расчёта показателей эффективности выбраны лучшие методы бинаризации для данных ДОЭ.

A.S. OVCHINNIKOV, V.V. KRASNOV, E.A. KURBATOVA

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

RESEARCH OF BINARIZATION METHODS FOR AMPLITUDE DIFFRACTION OPTICAL ELEMENTS WITHOUT A CARRIER SPATIAL FREQUENCY

Various binarization methods for amplitude diffraction optical elements (DOE) without a carrier spatial frequency have been studied. Based on the results of numerical and optical image reconstruction and further calculation of efficiency indicators, the best binarization methods for these DOE were selected.

Бинаризация ДОЭ необходима для их дальнейшей печати или вывода на микродзеркальные модуляторы света. Синтез ДОЭ осуществляется в два этапа. Первый основан на итерационном методе Герчберга-Сэкстона. Необходимое число итераций определяется по наступлению стагнации значения целевой функции, в роли которой выступает суперпозиция нормированного среднеквадратического отклонения (НСКО) и дифракционных потерь. В конце осуществляется бинаризация получившегося ДОЭ. Второй этап нацелен на снижение ошибки синтеза по результатам первого этапа и включает применение метода прямого поиска со случайной траекторией.

Локальные методы бинаризации основаны на том, что параметры, такие как локальное среднее, среднее отклонение, рассчитываются исходя из значений, лежащих в окне, которое пробегает все отсчёты изображения. Глобальные методы бинаризации основаны на том, что

параметры, такие как глобальное среднее и дисперсия, рассчитываются исходя из всех значений уровня серого на изображении. Были исследованы следующие методы бинаризации: Ниблака, Сауволя, Жанга, Вольфа, Ника, Сойла, среднего, медианного, среднего уровня серого, Оцу, Ли, Киттлера, Ридлера, Хуанга, Гласбея, Тсая, Дойла, Шанбага, треугольника, Йена. Для синтеза ДОЭ в качестве тестовых объектов были использованы два полутоновых и одно бинарное изображение. Параметры входных изображений: размер – 256 x 256 отсчётов для полутоновых изображений, 270 x 270 отсчётов для бинарного изображения; количество градаций яркости – 256 (у полутоновых изображений).

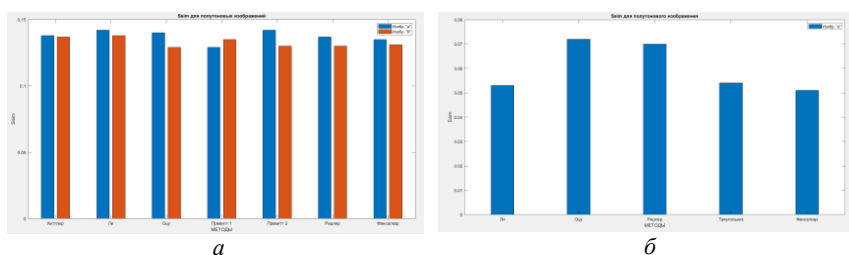


Рис. 1. Гистограммы значений параметра Ssim оптически восстановленных изображений для полутоновых входных изображений (а) и для бинарного изображения (б)

Проведённые численные и оптические эксперименты позволили определить лидирующие методы по значениям параметров эффективности, таких как НСКО и дифракционная эффективность. Значения параметра Ssim для этих методов показаны на рис. 1. Один из лучших результатов показал метод Ли. Для полутоновых изображений значение параметра Ssim в среднем равно 0,140, что на 4 % лучше, чем для остальных методов. В сравнении с параметром Ssim для метода Оцу, метод Ли показал результат на 1 % лучше. Для бинарного изображения значение параметра Ssim составляет 0,053, что сравнимо со значениями параметров остальных методов, кроме метода Оцу. Для бинарного изображения метод Оцу показал лучшие результаты (параметр Ssim равен 0,072, что в среднем на 26 % лучше, чем для остальных методов).

Таким образом, метод Ли является лучшим методом бинаризации для ДОЭ без несущей пространственной частоты содержащих полутоновые входные изображения, а метод Оцу – для бинарных входных изображений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 21-79-00117.

А.В. КОЗЛОВ, В.Г. РОДИН, П.А. ЧЕРЁМХИН

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ПОДАВЛЕНИЕ ШУМА В ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ ФИЛЬТРАЦИЕЙ С ИНТЕРПОЛЯЦИЕЙ

К числу важных задач реконструкции изображений, в том числе с цифровых голограмм относится снижение влияния шумов. В работе предлагается метод подавления шумов на основе фильтрации с интерполяцией изображений, восстановленных с цифровых голограмм. Получено повышение качества восстановления по сравнению со стандартными фильтрами.

A.V. KOZLOV, V.G. RODIN, P.A. CHEREMKHIN

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

REDUCTION OF NOISE IN DIGITAL HOLOGRAPHY BY FILTRATION WITH INTERPOLATION

Noise reduction is one of important tasks in digital holography and image reconstruction. Method of noise suppression by filtration with interpolation is proposed. Reconstruction quality was improved in comparison with standard algorithms.

Цифровая голография активно применяется в таких задачах, где требуется достичь высокого пространственного разрешения получаемой информации. Однако, собственные шумы камер [1], а также спекл-шумы при регистрации [2] существенно снижают качество восстановленных изображений. Поэтому разработаны программные и аппаратные подходы подавления шумов, например, такие как усреднение изображений, фильтры на основе преобразований или оценок и др. [3]. Каждый подход имеет свои ограничения: аппаратный требует большого числа голограмм, а программный имеет предел по увеличению качества. В связи с этим предложен метод фильтрации с интерполяцией [4]. В его основе лежит применение цифровой фильтрации к восстановленному изображению, разрешение которого увеличено интерполяционными методами. После проведения фильтрации его разрешение обратно снижается.

Для апробации предложенного метода были зарегистрированы цифровые голограммы Френеля отражающих объектов (на рис. 1а дан фрагмент голограммы). На восстановленном изображении (рис. 1б) видно наличие спекл-шума. Восстановленные изображения после действия трёх фильтров различного класса: медианной фильтрации, фильтров Ли [3] и

non-local means (NLM) [3] представлены на рис. 1(в, д, ж). Результаты применения этих фильтров после интерполяции показаны на рис. 1(г, е, з) соответственно. Для оценки качества восстановленных изображений использовался спекл-контраст [3], зона его расчёта обозначена на рис. 1б. Спекл-контраст при использовании фильтрации с интерполяцией был снижен в 1,4 раза больше, чем при использовании стандартных фильтров.

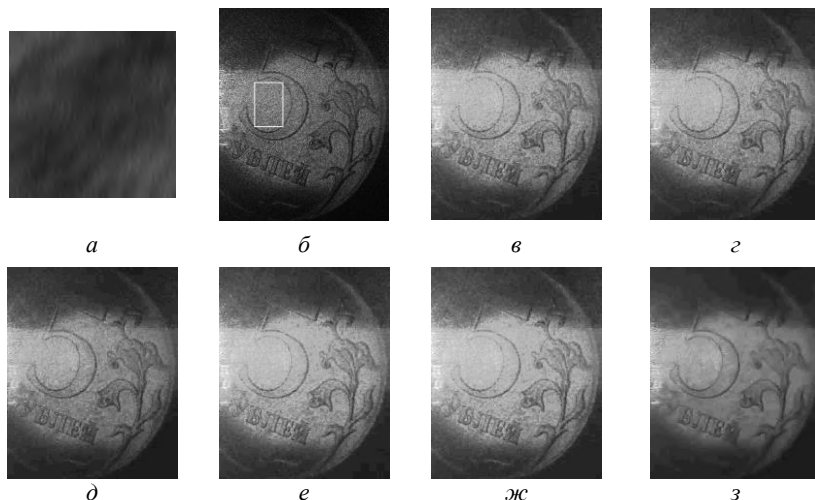


Рис. 1. Фрагмент зарегистрированной цифровой голограммы (а), восстановленные изображения: исходное (б), после фильтрации и фильтрации с интерполяцией медианным фильтром (в, г), фильтрами Ли (д, е) и NLM (ж, з) соответственно

Таким образом, метод обеспечил улучшение качества восстановления изображений. В силу универсальности он может комбинироваться с оптическими и гибридными методами увеличения качества изображений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 20-79-00291.

Список литературы

1. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Rodin V.G., Starikov R.S. // Optics and Lasers in Engineering. 2021. V. 139. P. 106461.
2. Bianco V., Memmolo P., Leo M., Montresor S., Distante C., Paturzo M., Picart P., Javidi B., Ferraro P. // Light: Science and Applications. 2018. V. 7(1). P. 48.
3. Kumar M., Tounsi Y., Kaur K., Nassim A., Mandoza-Santoyo F., Matoba O. // Journal of Optics. 2020. V. 22(6). P. 063001.
4. Козлов А.В., Черёмхин П.А. // X Межд. конф. по фотонике и информационной оптике: сб. научн. трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2021. С. 477-478.

Н.Н. ЕВТИХИЕВ, В.В. КРАСНОВ, Д.Ю. МОЛОДЦОВ,
В.Г. РОДИН, П.А. ЧЕРЁМХИН, Р.С. СТАРИКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

НЕКОГЕРЕНТНЫЙ КОРРЕЛЯТОР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА, СИНТЕЗИРОВАННОГО С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ХАРТЛИ

Выполнен компьютерный синтез амплитудных голограмм с использованием преобразования Хартли. Проведено распознавание тестовых изображений в некогерентном корреляторе на базе микрозеркального модулятора, подтвердившее возможность использования таких голограмм в задачах информационной оптики.

N.N. EVTIKHIEV, V.V. KRASNOV, D.Yu. MOLODTSOV,
V.G. RODIN, P.A. CHEREMKHIN, R.S. STARIKOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

NON-COHERENT CORRELATOR WITH UTILIZING OF HOLOGRAPHIC FILTER SYNTHESIZED USING HARTLEY TRANSFORM

Computer synthesis of amplitude holograms using the Hartley transform was performed. Image recognition in non-coherent correlator based on a micromirror modulator was carried out. It was confirmed the possibility of using such holograms as holographic filters in optical data proceeding.

В настоящее время микрозеркальные модуляторы, обладающие наибольшим быстродействием, успешно используются при решении различных задач информационной оптики в качестве устройств вывода амплитудных голограмм. Отличительной особенностью интегрального преобразования Хартли является то, что в отличие от преобразования Фурье образ действительной функции всегда является действительным, поэтому его удобно использовать при компьютерном синтезе именно амплитудных голограмм. Целью данной работы являлось исследование применимости в качестве фильтров в некогерентных оптических корреляторах амплитудных голограмм, синтезированных с использованием преобразования Хартли, при их выводе на микрозеркальном модуляторе.

Использованный в работе некогерентный коррелятор построен по стандартной «4f схеме». Был проведён синтез бинарных амплитудных

голограмм с использованием преобразования Хартли для различных изображений контурных объектов с числом отсчётов 1024×1024 . Вывод голограмм проводился на микрозеркальный модулятор Texas Instruments Discovery DLP9500BFLN (разрешение 1920×1080 пикселей, размер пикселя $10,8 \times 10,8$ мкм, частота смены кадров до 23 кГц). Для ввода изображений объектов был использован другой микрозеркальный модулятор. В выходной плоскости в нулевом порядке дифракции формируется изображение входного объекта, в первом порядке – сигналы взаимной корреляции. Рис. 1 иллюстрирует случай совпадения объектов (изображение на входе и записанное на голограмме – контур ромба), сформирован локализованный глобальный максимум корреляционного сигнала, свидетельствующий об идентификации объектов. На рис. 2 показан вид выходного сигнала коррелятора в случае несовпадения объектов (изображение на входе – контур квадрата). Отсутствие глобального максимума подтверждает различие сравниваемых объектов.



Рис. 1. Вид сигнала в выходной плоскости коррелятора в случае совпадения объектов



Рис. 2. Вид сигнала в выходной плоскости коррелятора в случае несовпадения объектов

Таким образом, получено экспериментальное подтверждение применимости голограмм, синтезированных с использованием преобразования Хартли, при распознавании объектов в оптических корреляторах. Учитывая то, что при синтезе голограмм с применением преобразования Хартли осуществляется в два раза меньше операций, в отличие от использования преобразования Фурье, файл такой голограммы имеет меньший размер, а также наилучшее среди всех типов модуляторов быстродействие микрозеркальных модуляторов, совместное применение таких синтезированных голограмм и модуляторов, особенно обосновано в высокоскоростных устройствах информационной оптики, где требуется оперативный синтез и вывод голограмм-фильтров.

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

-А-

Абдугафуров А.М. 463
Абрамов А.С. 487
Авдеев П.Ю. 337
Авдеева А.Ю. 149
Авдижиян А.Ю. 253
Авершин А.А. 185
Авласевич Н.Т. 561, 621, 625
Агапитов А.В. 513, 515
Азарова В.В. 183, 187
Аймуханов А.К. 257, 269, 271
Айт А.О. 319
Акимов А.А. 163
Акмалов А.Э. 335, 413
Аксенов М.Д. 126
Алатырев А.Г. 413
Алексеев Н.А. 349, 351, 353
Алсаиф Я. 387
Алымкулов С.А. 623, 641
Аманова М.А. 58
Амброзевич С.А. 279, 285
Анашкина Е.А. 169
Андреева О.В. 383, 385, 387
Андреева Я.М. 355
Андрейчиков К.С. 367, 369
Андрианов А.В. 169
Аникеева В.Е. 397
Аникьев А.А. 441, 445
Анисимов Р.И. 451
Анна К.И. 179
Антошин А.А. 114
Аракелян С.М. 249
Арапов Ю.Д. 213
Арефина И.А. 72
Арсенин А.В. 50, 64, 74, 86
Артанов В.В. 601
Архипов А.В. 631
Асеев В.А. 289
Астахов В.П. 367, 369
Асташкевич С.А. 325, 329
Афанасьев Д.А. 265
Афанасьев Н.А. 100, 108

Афанасьева О.Л. 219
Ахматханов А.Р. 31, 60
Ахметов Д.М. 573
Ахметова А.И. 425

-Б-

Бабаев А.А. 88
Бабкина А.Н. 303, 305, 307, 309, 313
Бадеев В.А. 493, 495, 505
Бадеева Е.А. 493, 509
Баззал Х. 353
Бакланова К.Д. 48
Бакунов М.И. 155, 161
Балакий В.И. 66
Балуев А.А. 405
Баранов К.Н. 255
Барачевский В.А. 319
Баранова О.П. 287
Барон Ф.А. 193
Барышникова С.Ю. 343
Бегичев И.В. 64
Безматерных Л.Н. 301
Безруков П.А. 359
Белашов А.В. 223, 557
Белинский А.В. 165
Белов А.В. 549
Белов К.Н. 106
Белокрылов М.Е. 501
Бельтюкова Д.М. 223
Беляева Т.Н. 223
Бикбаев Р.Г. 145, 149
Биленко И.А. 120, 128, 138
Билык В.Р. 337, 399
Бобе А.С. 429
Богачков И.В. 477, 481, 485, 489, 513, 515
Богословский А.В. 231
Бойко А.А. 31
Бойчук Е.С. 475
Боканова А.А. 257
Болдырев К.Н. 301, 311, 397, 407
Болотов Д.В. 547
Болошко А.А. 130, 409

Большаков А.Д. 247
 Борисенко А.С. 126
 Борисов В.Н. 179
 Бородако К.А. 263
 Бородин Ю.П. 221
 Бородин Л.Н. 179, 347
 Брагин И.О. 551
 Брюханов В.В. 283
 Бугай А.Н. 521
 Будников А.А. 82
 Булыга Д.В. 241, 267, 281
 Булычев Р.П. 575
 Бурданова М.Г. 82
 Бурмак Л.И. 587
 Бурцев А.А. 209
 Буряков А.М. 297, 333, 337
 Бусурин В.И. 575
 Бутов О.В. 167
 Буть А.И. 561
 Бухаров Д.Н. 249
 Бухвостов А.И. 309
 Бушко А.А. 455
 Бушув С.В. 589
 Бушунов А.А. 177
 Быковский А.Ю. 635
 Бычкова С.А. 197

-В-

Валитова А.Ф. 277
 Ванин А.И. 261
 Вартамян Т.А. 323
 Васильев Д.Д. 549
 Васильев Н.А. 635
 Васильев С.В. 231
 Васильевский И.С. 70
 Васильев Г.Т. 319
 Васютинский О.С. 223
 Веденин Е.И. 357
 Ведерникова А.А. 72
 Векшин М.М. 471
 Велигжанин А.А. 263
 Величко В.А. 455
 Вениаминов А.В. 179, 347
 Вердиев Б.И. 413
 Ветров С.Я. 145, 149
 Витухновский А.Г. 80
 Власов А.В. 361
 Вовк И.А. 347
 Вознесенская А.О. 429

Волков В.Г. 565, 569
 Волков В.С. 50, 64, 74, 86, 143
 Володин Н.Ю. 279
 Волошин В.В. 171
 Волчанина Е.В. 511
 Волчков С.С. 35
 Волынкин В.М. 321
 Волынский М.А. 229, 233
 Воробьев А.К. 62
 Воробьев И.Л. 171
 Воропай Е.С. 353
 Восканян Г.Р. 80
 Вохник О.М. 118
 Вьюнышев А.М. 193, 211

-Г-

Габитов И.Р. 37
 Гавриш С.В. 375
 Гаврушко В.В. 259
 Газизов А.Р. 273, 277
 Гайнутдинов Р.Х. 90
 Галкин М.Л. 120
 Галуцкий В.В. 437
 Ганжерли Н.М. 627, 631
 Гарифуллин А.И. 90
 Гарнаева Г.И. 639, 643
 Гаугель А.О. 215, 637
 Гейнц Ю.Э. 537
 Гендин В.Г. 233
 Георгиева А.О. 645
 Герасимов К.И. 203
 Гибни Д. 37
 Гийе Ж.-П. 199
 Гилев Д.Г. 173
 Гиндин П.Д. 565, 569
 Гиппиус Н.А. 33
 Гладкова Е.С. 233
 Гладуш Ю.Г. 138
 Голант К.М. 379
 Гольдт А.Е. 82
 Гомонов Д.Н. 551
 Гончаров Д.С. 42
 Горбатова А.В. 297
 Горбунков М.В. 122
 Горелов И.К. 138
 Горяев М.А. 239
 Гошев А.А. 519
 Грачев Я.В. 195
 Греско В.Р. 134

Григорьев К.С. 157
Грищенко А.В. 80
Гришаев Р.В. 389, 395
Гришин С.Г. 589
Грищенко И.В. 62
Громова П.С. 405
Губинская Д.А. 60
Гузаиров С.А. 163
Гуляев С.Н. 627, 631
Гунина Е.В. 134
Гуров И.П. 233
Гуськов А.А. 243, 333
Гущин М.Г. 323
Гущин С.В. 317

-Д-

Давлетшин Н.Н. 193
Давыдовская В.В. 455
Дайбаге Д.С. 279, 285
Данилин А.Н. 120, 128
Данилов П.А. 54
Дворецкий А.Г. 493
Денисов Д.Г. 183, 545, 563, 597
Дербуш Д.А. 231
Деревеницкая Д.Д. 613, 615
Державин С.И. 389
Дерменжи И.А. 343
Дёмина Л.И. 106
Джаманкызов Н.К. 623, 641
Долганов В.К. 48
Долганов П.В. 48
Долгирев В.О. 633
Долгополов А.Д. 134
Долотов С.М. 279
Дорогов А.Ф. 35
Дорофеев В.В. 169, 479
Дорофеев Д.В. 415
Дорофеева Е.В. 56
Дорошина Н.В. 86
Дорошкевич А.В. 415
Драчев В.П. 28
Дроздов И.Р. 475
Дружин В.В. 189
Дубиков А.В. 60
Дубовик А.Ю. 179, 255, 347
Дубынин С.Е. 221
Дудоров Е.А. 495, 503
Дукельский К.В. 92, 321
Дунеева Е.Э. 54

Дьяков С.А. 33
Дьяченко В.В. 365
Дю В.Г. 461

-Е-

Евлюхин А.Б. 143
Евстропьев С.К. 92, 241, 267, 281, 321
Евтихий Н.Н. 237, 653
Егизарян К.О. 40
Егорова К.А. 104
Егорова О.А. 116
Езерский А.С. 645
Елисеев Н.Н. 209
Елисеев С.П. 80
Епифанов Е.О. 339, 345
Ермаков В.С. 122
Ермолаев Г.А. 64
Есеев М.К. 519
Есин А.А. 31

-Ж-

Жанабаева А.К. 132
Железнов В.Ю. 341
Жеребцов Д.А. 106
Жесткий Н.А. 134
Жигарьков В.С. 94, 102
Жигулина И.В. 231
Жихорева А.А. 223
Жумалиев К.М. 641
Журавлев И.А. 126

-З-

Загорulyко К.А. 607
Зажогин А.П. 349, 351, 353, 411, 421
Заколдаев Р.А. 383, 385, 387
Заливако И.В. 126
Залипаев В.В. 195
Запотьилько Н.Р. 361, 363
Зарипов М.Р. 605
Захаров В.В. 247, 347
Захаров И.Н. 523
Захарчук И.А. 279, 285
Зейниденов А.К. 257
Землянов А.А. 537
Зимняков Д.А. 35
Злоказов Е.Ю. 613, 615
Золотовский И.О. 473, 487
Зотов А.М. 191
Зуева М.М. 393

Зыкова М.П. 287
Зырянова К.С. 303, 305, 307, 309

-И-

Ибрагимов А.А. 124
Ибрагимова Э.И. 583
Ибраев Н.Х. 275, 291
Иванов А.М. 467
Иванов М.А. 581
Иванов М.Г. 106
Иванов М.С. 297
Иванов С.И. 553
Ивахник В.В. 159, 163
Игнатьев А.И. 281
Иконников Д.А. 193, 211
Ильинский Р.Е. 483
Ильясов Б.Р. 257, 269, 271
Ионин А.А. 54
Ионин В.В. 209
Ирошников Н.Г. 581
Исаев В.А. 171
Исмаилов А.О. 195
Исманов Ю.Х. 619, 623, 641
Ишемгулов А.Т. 415
Ищенко А.А. 291
Ищенко П.И. 187

-К-

Кабанова О.С. 431
Кадетова А.В. 52
Казанцев С.Ю. 547
Казанцева А.Ю. 363
Казарян Д.А. 50, 64
Калинина А.А. 217
Калугин А.И. 343
Камынин В.А. 417, 487
Канапина А.Е. 265
Капизов Д.Р. 159
Каплунов И.А. 403, 465, 467
Карасик В.Е. 183, 545
Каргин Н.И. 70
Кармазин Л.И. 76
Карпач П.В. 319
Карпов В.В. 565, 569
Катков А.А. 361, 363
Катковник В.Я. 40
Киняевский И.О. 54
Киреев С.Г. 375
Киртаев Р.В. 86

Киселев А.В. 209
Кистенева М.Г. 461
Клишин Ю.А. 50, 64, 86
Князян Н.Б. 92
Ковалев В.И. 54
Коваленко М.Н. 349, 351, 353
Козина А. 104
Козлов А.В. 607, 651
Козловский К.И. 335
Коклюшкин В.А. 557
Колачевский Н.Н. 126
Колесова Е.П. 78, 255, 315
Колкер Д.Б. 31
Колмаков А.А. 451
Колосовский А.О. 171
Колташев В.В. 479
Командин Г.А. 82
Комарова О.С. 577
Компанец И.Н. 44
Кондаков Д.В. 553
Кондратьев В.М. 247
Кондратьев Н.М. 371
Конеев Р.В. 327
Конради Д.С. 559
Константинов Ю.А. 501
Константинова Е.И. 283
Концевая В.Г. 116
Коняшкин А.В. 62
Копенкин С.С. 221
Копылов Д.А. 147
Копьева М.А. 417
Корепанова А.Г. 429
Корибут А.В. 54
Корнилова Е.С. 223
Коробков К.А. 575
Короленко П.В. 118, 191
Коршунов В.М. 76
Косолапов А.Ф. 169
Косолапова К.Д. 72
Костин Р.В. 493
Кострицкий С.М. 447
Костромькина В.В. 401, 419
Костюк Г.К. 373
Котковский Г.Е. 335, 413
Котликов Е.Н. 469
Котов В.М. 585
Котова С.П. 207
Кочуров Л.А. 35
Кочурова Д.Н. 343

Кошелев А.В. 235
 Кравченко Я.В. 389
 Крайский А.А. 525, 529
 Крайский А.В. 225, 525, 529
 Краснов В.В. 613, 615, 649, 653
 Краснов Д.И. 189
 Кривенков В.А. 70
 Криштоп В.В. 173, 475
 Кроль И.М. 287
 Кропотов Г.И. 467
 Крупская А.Е. 331
 Кручинин Н.Ю. 245
 Кубанов Р.Т. 191
 Кудрявцев А.А. 325, 329
 Кудряшов С.И. 54
 Кузищин Ю.А. 335, 413
 Кузнецов А.С. 247
 Кузнецов П.И. 175, 379
 Кузнецов С.А. 565, 569
 Кузнецов С.В. 317
 Кузьменко Н.К. 267, 281
 Кузьмин М.С. 611
 Кузьмин Н.А. 213
 Кузьмин Н.Н. 311
 Кузьмич Д.Е. 60
 Кук И.А. 37
 Кукушкин А.Н. 495, 499, 503, 505
 Кулагин А.В. 187
 Кулак Г.В. 459
 Кулаков М.Н. 595
 Куликов К.Г. 116
 Кульпина Е.В. 305, 307, 309
 Кундикова Н.Д. 106
 Куплевич М.А. 437
 Купрейчик М.И. 66
 Курбатова Е.А. 649
 Курников М.А. 161
 Курочкин Н.С. 80
 Кучеренко М.Г. 151, 245, 295

-Л-

Лаврентьев Н.А. 84
 Лавров А.П. 553
 Лавров С.Д. 243, 251, 253
 Лавровская Н.П. 469
 Лапин В.А. 473, 487
 Ларичев А.В. 581
 Ласткин В.А. 259
 Лебедева Е.Д. 251, 253

Лейбов Л.С. 195
 Лентовский В.В. 577
 Летута С.Н. 415
 Ли Ся 167
 Литвин А.П. 88
 Литвинов И.К. 223
 Лобанов А.И. 417
 Лобанов В.Е. 128, 138
 Лонг Ж. 297
 Лоншаков Е.А. 120
 Лотин А.А. 209
 Лукашин В.П. 405
 Лукин А.В. 543
 Луккетти Л. 46
 Лутушина Д.С. 355
 Лыков И.И. 128
 Лысова Е.М. 567
 Львов К.В. 96
 Любынская Т.Е. 423
 Ляликов А.М. 561, 621, 625
 Ляпин А.А. 317

-М-

Макаева Р.Х. 605
 Макаревич А.В. 58, 453, 457, 459
 Макаренкова Н.А. 575
 Макаров В.А. 157
 Макаров Д.Н. 519
 Максимов А.Ю. 501
 Максимов Е.М. 335
 Максимов Л.В. 197
 Максимова Л.А. 599, 603
 Малашин Д.О. 235
 Малинский Т.В. 341
 Малышев О.К. 140
 Мальцев В.В. 311
 Мамонов Д.Н. 389
 Мамрашев А.А. 197
 Мандур М.М. 329
 Мануйлович И.С. 56
 Манукян Г.Г. 92
 Манцевич С.Н. 66
 Маргарян И.В. 88
 Маргарянц Н.Б. 233
 Марков А.П. 593
 Маркова Л.В. 349, 351
 Мартынов И.Л. 140, 335, 413
 Марченков А.Ю. 227
 Маскевич С.А. 319

Маслов А.В. 155, 161
 Маслова Ю.Я. 122
 Матвеев А.Т. 80
 Маурер И.А. 627, 631
 Махсудов Б.И. 435
 Машковцева Л.С. 547
 Мельников А.Н. 181, 543
 Мельникова Е.А. 46, 431
 Метлин М.Т. 76
 Мешков М.Н. 56
 Минаев Н.В. 94, 102, 114, 339, 345
 Минаева Е.Д. 114
 Минаков Ф.А. 197
 Минин И.В. 517, 533
 Минин О.В. 517, 533
 Минина О.В. 537
 Миниханов Т.З. 613, 615
 Миннегалиев М.М. 203
 Миньков К.Н. 120
 Миронов М.С. 86
 Миронова Т.В. 225
 Мирофянченко А.Е. 84
 Мирофянченко Е.В. 84
 Михайлова Ю.В. 134
 Михалевский В.А. 209
 Мишина Е.Д. 297
 Мкртчян А.А. 138
 Могильный В.В. 629
 Моисеев К.М. 549
 Моисеев С.А. 203
 Молодцов Д.А. 653
 Молчанов В.Я. 201
 Молчанов С.В. 467
 Молчанова А.Д. 301
 Моне П. 199
 Морозова А.А. 355
 Морковский А.Д. 241
 Моршнев С.К. 497
 Москвин М.К. 100, 108
 Моторин С.Е. 479
 Музафарова С.А. 463
 Муравлев М.В. 185
 Муратов Д.А. 381
 Мурашкина Т.И. 493, 495, 503, 505, 509
 Муслимов Э.Р. 573, 617
 Муссауи А. 267, 281
 Мушин Ф.Ю. 151
 Мысина Н.Ю. 599

-Н-

Набиев И.Р. 70
 Навыко В.Н. 58, 453, 455, 457, 459
 Надолинский А.М. 327
 Нажимхан Э.Т. 271
 Налбандян В.М. 295
 Наседкин Б.Н. 195
 Насибуллин А.Г. 82
 Нащекин А.В. 359
 Небаевский В.А. 555
 Нефедьев Л.А. 639, 643
 Нечипуренко Н.И. 421
 Низамова Э.И. 639, 643
 Никитин В.А. 471
 Николаев Н.А. 197
 Николаев Н.Э. 381, 393
 Никонов В.И. 159
 Никоноров Н.В. 267, 281, 359
 Ничипорко С.Ф. 457
 Новиков С.М. 86

-О-

Обыденнов Д.В. 201
 Овчаренко С.В. 333
 Овчинников А.В. 399
 Овчинников А.С. 649
 Овчинников К.А. 475
 Овчинников О.В. 285
 Оглоблин М.С. 187
 Одинцова Г.В. 100, 355
 Окунев В.О. 323
 Омарбекова Г.И. 271
 Орехова Н.А. 411
 Орлова А.О. 78, 179, 247, 255, 315, 347
 Осадченко А.В. 279, 285
 Осипов Е.В. 335, 413
 Осколкова Т.О. 78
 Остапив А.Ю. 62

-П-

Павельев В.С. 31
 Павлов А.В. 215, 637
 Павлов В.И. 371, 377
 Павлов И.Н. 579, 583, 591
 Павлов П.В. 601
 Павлычева Н.К. 543
 Павлюк А.С. 313
 Палатников М.Н. 52, 439, 443, 447, 449
 Панова Д.А. 74

Паньков А.А. 491, 507
 Парочкин А.В. 177
 Паршикова Т.В. 505, 509
 Патапович М.П. 351, 421
 Патрушев Б.А. 599, 603
 Пауков М.И. 82
 Пашин С.С. 241
 Пашковская И.Д. 421
 Пеньков С.А. 299
 Перепелица А.С. 285
 Перепелкина С.Ю. 104
 Перро Ж.-Б. 199
 Петров А.А. 373
 Петров Н.В. 195, 199, 557, 645
 Петров Н.И. 531, 535
 Петровский В.Н. 132
 Печенкин А.А. 405
 Печинская О.В. 571
 Пикулев В.Б. 439
 Пикуль О.Ю. 443
 Пименов Н.Ю. 253
 Пинаев З.А. 229
 Писарев П.В. 507
 Пискунов А.А. 299
 Платонов Д.Д. 549
 Плеханов А.А. 335
 Плёткин А.П. 551
 Подгорнов Д.П. 347
 Полетаев Д.А. 205, 541
 Поляков А.В. 511
 Пономаренко В.П. 84
 Попов В.С. 84
 Попов С.М. 167, 171
 Попова И.Ю. 413
 Попова М.Н. 397
 Поройков А.Ю. 227
 Потемкин Ф.В. 96
 Пржиялковский Я.В. 497
 Привалов В.Е. 357, 365
 Примак И.У. 433
 Прозоровская А.А. 571
 Пройдакова В.Ю. 317
 Прокопенко Т.А. 421
 Прокопова Д.В. 207
 Прокофьев Е.В. 100, 108
 Прохоров А.В. 143
 Пугачев Д.Ю. 375
 Путилин А.Н. 217, 221
 Путилин Н.А. 221

Пухтеев А.О. 411
 Пучков Н.И. 261
 Пыхтин Д.А. 145
 Пятнов М.В. 451

-Р-
 Рабенандрасана Ж. 547
 Ракович Ю.П. 70
 Распутный А.В. 147
 Ремзов А.Д. 539
 Ридер М.А. 247
 Рогалин В.Е. 341, 403, 465
 Рогов С.А. 611
 Рогожников Г.С. 401, 419, 423
 Родин В.Г. 651, 653
 Родин И.Р. 591
 Рожкова К.С. 269
 Ропот П.И. 457
 Русинов А.П. 293
 Рутковская Л.С. 349, 351
 Рушнова И.И. 431
 Рымкевич В.С. 130, 409
 Рымов Д.А. 237, 647
 Рябочкина П.А. 317
 Рябухо В.П. 603
 Рябушкин О.А. 62
 Рямбов Р.В. 98
 Ряховский Д.В. 171

-С-
 Сабиров Т.Н. 203
 Савельев Е.А. 136, 175, 379
 Савельев М.В. 539
 Савченков Е.Н. 60
 Садовникова Я.Э. 417
 Садовничий Р.В. 267, 281
 Сазонов А.И. 497
 Салахов М.Х. 273, 277
 Салова А.В. 223
 Сальников Н.И. 169
 Самагин С.А. 207
 Самохвалов П.С. 70
 Сапарина С.В. 112
 Саратовский А.С. 321
 Сахаров М.В. 559
 Свистунов А.С. 647
 Севостьянов О.Г. 447
 Седов В.С. 407
 Сейсембекова Т.Е. 257

Сектаров Э.С. 407
 Селиверстова Е.В. 275, 291
 Селюков А.С. 279, 285
 Семенин Н.В. 126
 Семенова И.В. 223
 Семенова Л.Е. 527
 Семенова О.И. 397
 Семенцов Д.И. 473
 Семериков И.А. 126
 Сеноотрусова С.А. 425
 Сергеев М.М. 134
 Серегин А.А. 263
 Сивак А.И. 359
 Сидоров А.И. 359
 Сидоров Н.В. 439, 443, 445, 449
 Сидоров П.Л. 126
 Сидорова О.В. 52
 Сидорюк О.Е. 56
 Силиванов М.О. 427
 Симони Ф. 46
 Сингх Р. 165
 Синев Д.А. 104
 Сирро С.В. 233
 Ситников Н.Н. 263
 Скаков П.С. 233
 Скрыбыкина А.А. 401, 419
 Слежкин В.А. 283
 Слинков Г.Д. 68
 Слюсаренко С.С. 46
 Смирнов В.Н. 126
 Смирнов М.В. 439
 Смирнов М.С. 285
 Смирнов Н.А. 54
 Смоленская О.А. 199
 Соколенко Б.В. 205, 541
 Соловей А.К. 429
 Соловьев В.Г. 261
 Соловьева Г.С. 367
 Средин В.Г. 559
 Стамболян В.А. 289
 Станкевич А.И. 629
 Стариков Р.С. 42, 237, 555, 595, 653
 Старостин Н.И. 497
 Стативка К.А. 551
 Степанов А.Р. 601
 Степанов В.С. 467
 Степанова М.С. 347
 Столярова В.Л. 92
 Стремоухов С.Ю. 96

Стрикица Н.В. 437
 Строганова Е.В. 437
 Судас Д.П. 175, 379
 Сундеев Р.В. 263
 Сутомрин В.С. 193
 Сюй А.В. 74, 82

-Т-

Тайдаков И.В. 76
 Татмышевский М.К. 50
 Телешевский В.И. 589
 Телина И.С. 259
 Темерева А.С. 451
 Теплякова Н.А. 443
 Тешаев П.Р. 547
 Тимофеев И.В. 145, 149, 451
 Титов Р.А. 449
 Ткачук А.П. 413
 Токсумаков А.Н. 64
 Толова А.А. 495, 503, 505
 Толстик А.Л. 46, 431
 Травень В.Ф. 279
 Третьяков Д.А. 555
 Третьяков С.А. 465, 467
 Трикишев А.И. 417
 Трифонова А.В. 98
 Тропин А.Н. 469
 Трушин С.М. 153
 Тунгушбаева Д.Н. 269
 Туров А.Т. 501
 Тынышова Т.Д. 619

-У-

Уколов Д.С. 405
 Умаров М.Ф. 441, 445
 Ус Н.А. 185
 Утамурадова Ш.Б. 463
 Ушакова Е.В. 72

-Ф-

Фазилов Д.Э. 369
 Фазилова И.Э. 369
 Файзуллоев И.Х. 435
 Федоров Д.Л. 577
 Федоров П.П. 317
 Федорцов А.Б. 427
 Федянина М.А. 60
 Филатов А.Л. 593
 Филатов В.В. 331

Филатова С.А. 417
Филин С.А. 403
Фирстов С.В. 479
Фокин В.А. 211
Фокин В.В. 187
Фрадкин И.М. 33
Франк А.Д. 102

-Х-

Хабарова К.Ю. 126
Халяпин В.А. 521
Хамадеев М.Х. 90
Ханин С.Д. 261
Хариноева Т.А. 140
Харинцев С.С. 110, 112, 273
Харисова Р.Д. 303
Харитонов Д.Ю. 617
Харитончик Р.А. 411
Хасаншина Н.А. 493
Хатыров Н.П. 371, 377, 607
Хомутов А.А. 551
Хомченко А.В. 433
Хопёрский А.Н. 327
Хохлов Д.Д. 227
Храмцов Э.А. 629
Хусьянов Д.И. 333, 337
Хыдырова С. 549

-Ц-

Царева А.М. 605
Царева К.А. 605
Цветков А.В. 261
Цветков М.В. 579
Целиков Г.И. 74
Циплакова Е.Г. 199
Цыпин Д.В. 35
Цыпкин А.Н. 195
Цюрко Д.Е. 415

-Ч-

Чаморовский Ю.К. 167, 171
Чеканова Г.В. 367
Ченг Ч.-Ж. 557
Челлаков А.Н. 543
Чепцов В.С. 102
Чепцов Д.А. 279
Черёмхин П.А. 237, 595, 647, 651, 653
Чернецова И.А. 315
Черных А.В. 645

Черных Е.А. 110
Чернышева О.В. 263
Чертович И.В. 187
Чефонов А.В. 399
Чехлова Т.К. 381, 393
Чжоин Ван 167
Чинь Н.Х. 353
Чиркова И.М. 447
Чистяков А.А. 140, 335, 413
Чмерева Т.М. 151
Чопард А. 199
Чувакова М.А. 31, 60

-Ш-

Шабалин Ю.В. 122
Шаввич В.И. 369
Шакиров Н.И. 605
Шандаров С.М. 60, 451, 457, 459, 461
Шараева А.Е. 451
Шарангович С.Н. 633
Шарафеев А.Р. 479
Шарикова М.О. 227
Шахмин А.А. 465
Шачнева Е.А. 493
Шашкин А.В. 92
Шашковский С.Г. 375
Шевкунов И.А. 40, 557
Шеляков А.В. 263
Шеманин В.Г. 357, 365
Шепелевич В.В. 58
Шилова И.В. 391
Широкова А.В. 155, 161
Шитиков А.Е. 128, 138
Шишкина А.С. 383
Шишков Г.М. 157
Шкуратова В.А. 373
Шкадаревич А.П. 629
Шорохов А.С. 124
Шостак Е.С. 437
Шостка Н.В. 205
Шубный А.Г. 345
Шульга А.В. 391
Шундалов М.Б. 411
Шур В.Я. 31, 60
Шутова О.А. 153

-Щ-

Щекин А.С. 132

-Ю-

Юркова А.Н. 593
Юрченко Д.А. 92
Юсупов В.И. 94, 102, 339, 345
Юшков К.Б. 68, 201

-Я-

Якимук В.А. 387
Яковенко Н.А. 471
Якубов С.И. 205

Якубовский Д.И. 50, 64, 82, 86
Якунин В.П. 389, 395
Якушев А.И. 363
Якушенков П.О. 609
Якущева Г.Г. 175
Яминский И.В. 425
Яндыбаева Ю.И. 385
Яников М.В. 261
Яровой И.Ю. 647