

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

---

# **XV МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФОТОНИКЕ И ИНФОРМАЦИОННОЙ ОПТИКЕ**

**СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ**

Москва

УДК 535(06)+004(06)

ББК 72г

Н 34

**XV МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФОТОНИКЕ И  
ИНФОРМАЦИОННОЙ ОПТИКЕ: Сборник научных трудов.** М.: НИЯУ МИФИ,  
2026. – 664 с.

Сборник научных трудов содержит доклады, включенные в программу XV Международной конференции по фотонике и информационной оптике, проходившей 28-30 января 2026 г. в г. Москве. Тематика конференции охватывает широкий круг вопросов: когерентная и нелинейная оптика, оптика кристаллов, волоконная и интегральная оптика, взаимодействие излучения с веществом и оптические материалы, оптическая связь, цифровая оптика и синтез дифракционных оптических элементов, голография и оптическая обработка информации, оптоэлектронные устройства, прикладные вопросы оптики.

Предназначен для интересующихся данной тематикой.

Ответственный редактор Родин В.Г.

Статьи получены до 30 ноября 2025 года.

Материалы издаются в авторской редакции.

ISBN 978-5-7262-3224-9

© Национальный исследовательский  
ядерный университет «МИФИ», 2026

Подписано в печать 28.01.2026. Формат 60×84 1/16.

Печ. л. 41,5. Изд. № 003-2. Тираж 60 экз. Заказ № 4.

*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

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

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

Драчев В.П. – Сколковский институт науки и технологий, Москва

Козлов С.А. – Университет ИТМО, Санкт-Петербург

Комоцкий В.А. – Российский университет дружбы народов, Москва

Криштоп В.В. – Пермская научно-производственная приборостроительная компания

Кульчин Ю.Н. – Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН,  
Владивосток

Кутанов А.А. – Институт физико-технических проблем и материаловедения НАН  
Кыргызской Республики, Бишкек

Лавров А.П. – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

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

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

Рябухо В.П. – Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов

Сазонов С.В. – Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,  
Москва

Стариков Р.С. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Твердохлеб П.Е. – Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск

Толстик А.Л. – Белорусский государственный университет, Минск

Фетисов Ю.К. – Московский технологический университет (МИРЭА)

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

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ДЫШЛЮК А.В., ПРОСКУРИН А.А., БОГДАНОВ А.А., ВИТРИК О.Б.<br>Аналитическое моделирование возбуждения поверхностных<br>плазмон-поляритонов в наноструктурах на основе теоремы<br>взаимности.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 28 |
| ЦЫПКИН А.Н., МЕЛЬНИК М.В., НАБИЛКОВА А.О., ИСМАГИЛОВ А.О.,<br>МАТЮЩЕНКО Р.Д., ГУСЕЛЬНИКОВ М.С., АРЦЕР И.Р., ЖУКОВА М.О.,<br>КОЗЛОВ С.А.<br>Нелинейный отклик материалов в терагерцовом диапазоне частот.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 31 |
| ПРОХОРОВ А.В., ШЕСТЕРИКОВ А.В., ГУБИН М.Ю., НОВИКОВ С.М.,<br>КИРТАЕВ Р.В., ТИТОВА Е.И., ТОКСУМАКОВ А.Н., ЯКУБОВСКИЙ Д.И.,<br>АРСЕНИН А.В., ВОЛКОВ В.С.<br>Анизотропные метаповерхности на основе традиционных и новых<br>оптических материалов.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 33 |
| НОВИКОВ В.Б., СМЕРНОВ К.А., ДОЦЕНКО А.А., РОСЛЯКОВ И.В.,<br>СОТНИЧУК Е.О., НАПОЛЬСКИЙ К.С., МАЙДЫКОВСКИЙ А.И.,<br>МУРЗИНА Т.В.<br>Маятниковый эффект в двумерных гексагональных фотонных кристаллах.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 35 |
| МУТИЛИН С.В., МИЛЁХИН А.Г., МАКАРОВ Ю.С., СЕЛЕЗНЕВ В.А.,<br>ТУМАШЕВ В.С., БАГОЧЮС Е.К., МАНЦУРОВ Н.Д., РЕЧКУНОВ С.Н.,<br>ГАЙДУК А.Е., КОМОНОВ А.И., АЗАРОВ И.А., КРЕМИС И.И., ТУРБИН А.В.,<br>ГЛАДКОВ Р.А., ВАСИЛЬЕВ В.В., МОИСЕЕВ А.А., СУТОРМИН В.С.,<br>КРАХАЛЕВ М.Н., БАРАННИК А.В., ФЕЙЗЕР К.А., АБДУЛЛАЕВ А.С.,<br>КОСТИКОВ Д.А., ПРИЩЕПА О.О., ЛЕСНОЙ М.А., ЗЫРЯНОВ В.Я.,<br>РУДАКОВ С.Д., СУРОДИН С.И., ШОБОЛОВ Е.Л., ШОБОЛОВА Т.А.,<br>ЛИННИК Д.М., ЮРИН В.А., ШАГАЛИЕВ Р.М., ЛАТЫШЕВ А.В.<br>Создание пространственного фазового модулятора света на жидких<br>кристаллах с высоким разрешением..... | 37 |
| РЕЗЦОВ Т.В., ЧЕРНЫХ А.В., СТЕПАНОВ И.Г., ОРЛОВА Т.Н.,<br>ПЕТРОВ Н.В.<br>Исследование динамического отклика двухчастотного нематического<br>жидкого кристалла для гомогенизации лазерного пучка.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 39 |
| ШИШКОВ Г.М., ГРИГОРЬЕВ К.С., МАКАРОВ В.А.<br>Генерация векторных пространственно-временных оптических вихрей<br>при самовоздействии светового импульса в изотропной фазе<br>нематического жидкого кристалла при температуре близкой<br>к температуре перехода в мезофазу.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 41 |
| ДОЛГАНОВ П.В., МАКСИМОВ Е.А., БАЛЕНКО Н.В., ДОЛГАНОВ В.К.<br>Трёхмерные жидкокристаллические фотонные кристаллы<br>с управляемыми характеристиками.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 43 |
| ОЛЕЙНИКОВА А.П., ДАДЕНКОВ И.Г., ТОЛСТИК А.Л.<br>Дифракционные оптические элементы в фоторефрактивных кристаллах.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 45 |



|                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| БУРЦЕВ А.А., ИОНИН В.В., КИСЕЛЕВ А.В., МИХАЛЕВСКИЙ В.А., НЕВЗОРОВ А.А., ЛОТИН А.А.                                                                    |    |
| Ячейки адаптивного фазосдвигающего фильтра с оптическим управлением на основе тонких плёнок фазоизменяемых материалов.....                            | 47 |
| ЗЛОБИН А.О., ШМИДТ А.А., КОЛЕСНИКОВ Д.С., БУРИМОВ Н.И., ШАНДАРОВ С.М.                                                                                 |    |
| Взаимодействие циркулярной опорной волны с эллиптически-поляризованной сигнальной волной на пропускающей голограмме в кристалле силиката висмута..... | 49 |
| ЖУРАВЛЕВ В.А., КОЗЛОВ А.А., НОРОВА А.А., ПЕТУХОВ И.В., ДЕМИН В.А.                                                                                     |    |
| Особенности изменения показателя преломления в тонкоплёночном ниобате лития после модификации протонным обменом.....                                  | 51 |
| САРАФАНОВА М.В., ШУГУРОВ А.И., БАКУНОВ М.И.                                                                                                           |    |
| Попутная генерация многопериодного терагерцового излучения фемтосекундным лазерным импульсом в кристалле ниобата лития.....                           | 53 |
| МОЛЧАНОВА А.Д., КЛИМИН С.А., КУЗЬМИН Н.Н., ИНЬ Л.Х., ПОПОВА М.Н.                                                                                      |    |
| Исследование магнитного упорядочения мультиферроика $h\text{-YbMnO}_3$ методом спектроскопии высокого разрешения.....                                 | 55 |
| КУЛИКОВА Д.П., ШЕЛАЕВ А.В., ЛОТКОВ Е.С., БАБУРИН А.С., РОДИОНОВ И.А., БАРЫШЕВ А.В.                                                                    |    |
| Газохромные свойства аморфного и кристаллического триоксида вольфрама.....                                                                            | 57 |
| ХАРИСОВА Р.Д., РАТОВА А.Д., ЗЫРЯНОВА К.С., МИРОНОВ Л.Ю.                                                                                               |    |
| Механоиндуцированный синтез нанокристаллов перовскитов $\text{CsPbBr}_3$ на поверхности борогерманатного стекла.....                                  | 59 |
| СЮЙ А.В., ЗАВИДОВСКИЙ И.А., МАРТЫНОВ И.В., ПОЗОВ Б.Е.                                                                                                 |    |
| Дефектная инженерия против аморфизации: различные фотокаталитические механизмы в лазерно-синтезированных ниобиевых оксидах.....                       | 61 |
| МЕЛЬНИКОВА А.М., ЦОРИЕВА А.В., КОРШУНОВ В.М., ЧМОВЖ Т.Н., ТАЙДАКОВ И.В.                                                                               |    |
| Управление фотофизическими свойствами донорно-акцепторных молекул на основе трициклического акцептора.....                                            | 63 |
| АШИХМИН Д.И., АШАРЧУК Н.М., СЕДОВА Ю.К., РОВЕНКО В.В., ЖИГАРЬКОВ В.С., МИНАЕВ Н.В., МАРЕЕВ Е.И., ЮСУПОВ В.И.                                          |    |
| Динамика лазерно-индуцированных ударных волн и кавитационных пузырей в гидрореле при фемтосекундном пробое.....                                       | 65 |
| ФЕРУЛЕВ А.И., КОРШУНОВ В.М., ТАЙДАКОВ И.В.                                                                                                            |    |
| Люминесценция комплексов иона европия (III) с перфторированными органическими лигандами.....                                                          | 67 |
| МАКАРКИН Г.Л. КЕСАЕВ В.В., ЛОБАНОВ А.Н., АМБРОЗЕВИЧ С.А.                                                                                              |    |
| Поляризованная люминесценция деформированной полимерной матрицы с внедрённым органическим красителем.....                                             | 69 |

|                                                                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| КОРОЛЕВА Т.В., ХАКИМОВ К.Т., САПЦОВА О.А., ЯКОВЛЕВ В.О.,<br>ВЕРШИНИНА О.В., МЕДВЕДЕВ А.Г., ПОПОВ В.С.                                                                                           |    |
| Роданидный комплекс ртути в качестве прекурсора для синтеза<br>коллоидных квантовых точек HgTe для ИК-фотосенсоров.....                                                                         | 71 |
| МИСНИКОВА Т.С., ЛЕБЕДЕВ В.Ф.                                                                                                                                                                    |    |
| Диагностика C, NV <sup>-</sup> : HPNT алмаза как нового лазерного материала.....                                                                                                                | 73 |
| МАРТЬЯНОВ А.К., ТЯЖЕЛОВ И.А., РОМАЩЕНКО Р.В., СЕДОВ В.С.,<br>ПОПОВИЧ А.Ф.                                                                                                                       |    |
| Снижение шероховатости толстых поликристаллических алмазных<br>плёнок непосредственно в процессе CVD-осаждения.....                                                                             | 75 |
| ПОМАЗКИН Д.А., ДАНИЛОВ П.А., ВИНС В.Г., СКОРИКОВ М.Л.,<br>КУДРЯШОВ С.И., ВЯТКИН С.В., ДУОНГ Ф.В., МИН Ф.Х.                                                                                      |    |
| Исследование фотофизических характеристик НЗ-центров в алмазе.....                                                                                                                              | 77 |
| ЕСЕЕВ М.К., МАКАРОВ Д.Н., ЯШИН С.В., КОСТИН А.А.                                                                                                                                                |    |
| Исследование процессов фотолюминесценции в компактном<br>широкодиапазонном измерителе магнитного поля на основе<br>монокристаллических алмазных пластин с азотно-вакансионными<br>центрами..... | 79 |
| ЛЕБЕДЕВ В.Ф., МИСНИКОВА Т.С., РЫВКИНА Я.А.                                                                                                                                                      |    |
| Спектрально-временные свойства суперлюминесценции<br>C, NV <sup>-</sup> : HPNT алмаза.....                                                                                                      | 81 |
| ТЯЖЕЛОВ И.А., МАРТЬЯНОВ А.К., СЕДОВ В.С., КУЗНЕЦОВ С.В.,<br>ЗАВЬЯЛОВ П.С., МАКАРОВ С.Н., КАРПОВ Д.В., КУПЕР К.Э.                                                                                |    |
| Алмазные люминесцентные мониторы пучка синхротронного излучения:<br>синтез и испытание.....                                                                                                     | 83 |
| ЕФРЕМЕНКО В.Г., МАРТЫНОВ И.В., АНТОНЫЧЕВА Е.А., УШКОВ А.А.,<br>ВИШНЕВЫЙ А.А., ЦЕЛИКОВ Г.И., АРСЕНИН А.В., СЮЙ А.В.                                                                              |    |
| Фототермическое преобразование солнечного света на наночастицах<br>TiN, Ti <sub>3</sub> C <sub>2</sub> и Au.....                                                                                | 85 |
| МУРАТОВА Е.Н., МАКСИМОВ А.И., РЯБКО А.А., ГАГАРИНА А.Ю.,<br>ВРУБЛЕВСКИЙ И.А., АЛЕШИН А.Н., МОШНИКОВ В.А.                                                                                        |    |
| Архитектоника солнечных элементов на основе допированных<br>перовскитных ячеек.....                                                                                                             | 87 |
| СОКОЛОВА Д.А., ПОДСВИРОВ О.А., ИЕШКИН А.Е., ТАТАРИНЦЕВ А.А.,<br>ЛИХАЧЕВ А.И., НАЩЕКИН А.В., МЯСОЕДОВ А.В.                                                                                       |    |
| Формирование слоя наночастиц серебра в приповерхностной области<br>силикатного стекла с помощью электронного облучения.....                                                                     | 89 |
| УРМУРЗИН Д.Д., БОБКОВ А.А.                                                                                                                                                                      |    |
| Анализ плазмонных свойств спечённых серебряных структур<br>на фрактальных треках электрического пробоя методом совмещённой<br>АСМ-рамановской спектроскопии.....                                | 91 |
| БУРМИСТРОВ Е.Р., АВАКЯНЦ Л.П.                                                                                                                                                                   |    |
| Масштабирование энергии в терагерцовом диапазоне. оптимизация путём<br>управления периодом затвора.....                                                                                         | 93 |

|                                                                                                                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ДИК Т.А., НИКОЛАЕВА И.А., ШИПИЛО Д.Е., РИЗАЕВ Г.Э., КОРИБУТ А.В.,<br>ПАНОВ Н.А., ВРУБЛЕВСКАЯ Н.Р., ЛЕВУСЬ М.В., СЕЛЕЗНЕВ Л.В.,<br>КОСАРЕВА О.Г.                                          |     |
| Особенности генерации второй гармоники при фемтосекундной<br>филаментации в воздухе в условиях слабой фокусировки.....                                                                   | 95  |
| МАРАКУЛИН А.С., ПАУКОВ М.И., ЯКУБОВСКИЙ Д.И., БУРДАНОВА М.Г.,<br>АРСЕНИН А.В.                                                                                                            |     |
| Исследование оптических свойств ультратонких золотых плёнок<br>в широком спектральном диапазоне.....                                                                                     | 97  |
| САМЫШКИН В.Д., ОСИПОВ А.В., АБРАМОВ А.С., КУЗНЕЦОВ А.А.,<br>БОДУНОВ Д.А., КУЧЕРИК А.О.                                                                                                   |     |
| Оптоэлектрические свойства линейных углеродных цепей, осаждённых<br>в виде квазипорядоченных плёнок.....                                                                                 | 99  |
| СМИРНОВ К.А., БАТУЕВ И.О., МАЙДЫКОВСКИЙ А.И., МУРЗИНА Т.В.                                                                                                                               |     |
| Оптические нелинейные и резонаторные свойства микрокристаллов<br>перилена.....                                                                                                           | 101 |
| ШУЛЫНДИН П.А., РУМЯНЦЕВ Б.В., ПУШКИН А.В., МИГАЛЬ Е.А.,<br>ПОТЁМКИН Ф.В.                                                                                                                 |     |
| Расширение спектра гармоник высокого порядка при воздействии<br>двухцветного интенсивного фемтосекундного лазерного излучения<br>ближнего и среднего ИК-диапазонов на газовую среду..... | 103 |
| ЛЕВУСЬ М.В., РИЗАЕВ Г.Э., ДИК Т.А., СЕЛЕЗНЕВ Л.В., ГЕЙНЦ Ю.Э.                                                                                                                            |     |
| Увеличение расстояния распространения интенсивного лазерного<br>импульса с помощью каскада керровских линз.....                                                                          | 105 |
| МОЛЬКОВ Т.С., МАРТЫНОВ И.Л., ФАДЕЕВ С.В., ПЛЕХАНОВ А.А.,<br>ЧИСТЯКОВ А.А.                                                                                                                |     |
| Металлосетчатые полосовые фильтры для гармоник терагерцового<br>IMPRATT диода, изготовленные методом лазерной абляции.....                                                               | 107 |
| ВАШУКЕВИЧ Е.А., СУРМАЙ Р., ЛЕОНОВ В.А.                                                                                                                                                   |     |
| Перепутывание двух кудитов произвольной размерности с помощью<br>фарадеевского светоатомного взаимодействия.....                                                                         | 109 |
| ДЕРГАЧЕВ А.А., ШЛЕНОВ С.А.                                                                                                                                                               |     |
| Самовоздействие оптического вихря, формируемого спиральной фазовой<br>пластинкой из эллиптического гауссова пучка.....                                                                   | 111 |
| ТИМОЩЕНКО Е.В., ЮРЕВИЧ В.А.                                                                                                                                                              |     |
| Сверхизлучение в резонаторе в условиях квадратичного эффекта Штарка....                                                                                                                  | 113 |
| МАКАРОВ Д.Н., АРХИПОВ М.Ю.                                                                                                                                                               |     |
| Непертурбативное сечение томсоновского рассеяния одномодового<br>излучения на свободном электроны.....                                                                                   | 115 |
| СОЛОДОВНИКОВ А.А., КАЗАКОВ И.И., КОЗЛОВ С.А.                                                                                                                                             |     |
| Диапазон усиления оптического транзистора на основе беззеркального<br>нелинейного интерферометра Фабри-Перо в терагерцовом спектральном<br>диапазоне.....                                | 117 |

ПЕТРОВ Н.И., СОКОЛОВ Ю.М., СТОЯКИН В.В., ДАНИЛОВ В.А., ПОПОВ В.В.,  
УСИЕВИЧ Б.А.

Поверхностный плазмонный резонанс в субволновых дифракционных  
решётках.....119

ГЕЙНЦ Ю.Э., МИНИНА О.В.

Барометрическое управление филаментацией мощных фемтосекундных  
лазерных импульсов в воздухе.....121

ГЕРАСИМОВ Н.М., ТЕРЕТЁНКОВ А.Е.

Повторные измерения и их инвазивность в задачах  
квантовой термометрии.....123

КОЛОСОВ Г.А., ШОРОХОВ А.С., ФЕДЯНИН А.А.

Численное моделирование элементов оптической памяти на основе  
материалов с фазовым переходом.....125

КВИТКО А.С., КОЛОСОВ Г.А., ШОРОХОВ А.С., ФЕДЯНИН А.А.

Численное моделирование интегральных высокодобротных резонаторов  
на основе материалов с фазовым переходом.....127

СИНГХ Р., ТЕРЕТЁНКОВ А.Е.

Оптимизация длины нелинейного кристалла для генерации сцепленных  
фотонных состояний подобных котам Шредингера в процессе  
спонтанного параметрического рассеяния.....129

ЕГОРОВ В.К., ЕГОРОВ Е.В., АФАНАСЬЕВ М.С.

Прямое доказательство волноводно-резонансного распространения света  
в волокнах.....131

ЦАРЕВ В.С., МИЛОВИЧ Ф.О., ПРЯМИКОВ А.Д., АЛАГАШЕВ Г.К.,  
ОХРИМЧУК А.Г.

Прямая лазерная запись анизотропных наноструктур в кварцевом  
стекле одиночными фемтосекундными импульсами.....133

БАТУЕВ И.О., СМЕРНОВ К.А., МУРЗИНА Т.В., МАЙДЫКОВСКИЙ А.И.

Роль подложки в функционировании волноводных структур,  
изготовленных методом двухфотонной лазерной литографии.....135

ЧЕТВЕРИН Р.С., ШАРИПОВА М.И., ФЕДЯНИН А.А.

Изготовление ахроматических дифракционных линз методом  
двухфотонной лазерной литографии.....137

ЛЮБОШЕНКО В.А., ЕЛХИМОВ Д.А., ЗАЯКИН О.А., КОТОВА С.П.,  
МАМЗИКОВ М.Н., ПОНОМАРЕВ А.И., САПЦИНА Т.Н.

Восстановление характеристик кластеров оптических неоднородностей  
в дистиллированной воде методами малоуглового светорассеяния.....139

ФИЛОХИН Г.А., КОВАЛЕНКО Н.В.

Построение предсказательной модели морфологии лазерных абляционных  
колонок в биологических тканях на основе машинного обучения.....141

КРИВЕЦКАЯ А.А., САВЕЛЬЕВА Т.А., КУСТОВ Д.М., ЛЕВКИН В.В.,  
РОМАНИШКИН И.Д., ХАРНАС С.С., ЛОЩЕНОВ В.Б.

Разработка методики оценки оптических свойств биологических тканей  
ex vivo на основе обратного метода удвоения-добавления.....143

|                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| УРЮПИНА В.К., ГОРБУНОВ Н.А., КОТОВА С.П., ЛОСЕВСКИЙ Н.Н.,<br>МАЙОРОВА А.М.                                               |     |
| Опtotермическое манипулирование полистироловыми микросферами<br>с клетками почек при пониженной температуре.....         | 145 |
| БЕЛОВ К.Н., ГУЛЬМ А.Д., ИВАНОВ М.Г., КУНДИКОВА Н.Д.                                                                      |     |
| Визуализация структуры оптической керамики методом<br>комбинационного рассеяния света.....                               | 147 |
| МУРАТОВ Д.А., НИКОЛАЕВ Н.Э., ЧЕХЛОВА Т.К.                                                                                |     |
| Дополнительные возможности совмещения методов расчёта<br>спектральных свойств композитных сред.....                      | 149 |
| ПРОСОВСКИЙ Ю.О., ПРОСОВСКИЙ О.Ф., ИСАМОВ А.Н.,<br>СМОЛЬЯНИНОВ В.А., СОЛОПОВ Г.В.                                         |     |
| Получение равнотолщинных оптических покрытий<br>перспективным методом PARMS.....                                         | 151 |
| ФАНДИЕНКО И.Ю., ВИШНЯКОВ Г.Н., МИНАЕВ В.Л., ШУМСКИЙ Е.В.                                                                 |     |
| Опыт применения эталонных зеркал для коррекции аберраций<br>оптической системы интерференционного микроскопа.....        | 153 |
| СМОЛЬЯНИНОВ В.А., ПРОСОВСКИЙ О.Ф., ИСАМОВ А.Н.,<br>ПРОСОВСКИЙ Ю.О., ПЕТРАЧКОВ Д.Н.                                       |     |
| Получение оптических покрытий с заданным градиентом толщины<br>на изделия авиационного остекления.....                   | 155 |
| ТЕРЕХИН В.В., ГРИГОРЬЕВ О.В., ОГУРЦОВА К.М.                                                                              |     |
| Перспективные направления развития системы «СВЧ КИТ»<br>в радиофотонике.....                                             | 157 |
| ЛАСКАВЫЙ Н.С.                                                                                                            |     |
| Фотонная радиочастотная память с использованием<br>рециркуляционной линии задержки.....                                  | 159 |
| КАЗЬМИН М.И., НЕБАВСКИЙ В.А., СТАРИКОВ Р.С.                                                                              |     |
| Формирование оптических спектров в стандартных модуляторах<br>Маха–Цендера.....                                          | 161 |
| КАБАК Е.В., КОЛОСОВ Г.А., ШОРОХОВ А.С., ФЕДЯНИН А.А.                                                                     |     |
| Оптические модовые делители на нитридно-кремниевой платформе.....                                                        | 163 |
| КУНЕЦ М.А., АШУРКОВА А.А., ШИТИКОВ А.Е., ЧЕРМОШЕНЦЕВ Д.А.                                                                |     |
| Эффективное кодирование произвольных спиновых систем Изинга<br>в пространственной фотонной машине Изинга.....            | 165 |
| СОБОЛЕВА Е.В., РУДЫЙ С.С., ИВАНОВ А.В.                                                                                   |     |
| Оптомеханическая платформа для аналоговой обработки информации<br>на основе управляемой пространственной бифуркации..... | 167 |
| САМОДЕЛКИН Д.А., КУНЕЦ М.А., ШИТИКОВ А.Е., ЧЕРМОШЕНЦЕВ Д.А.                                                              |     |
| Анализ случайности поляризационных состояний<br>в нелинейном кольцевом резонаторе с рубидиевой газовой ячейкой.....      | 169 |
| АВДЕЕВ В.В., ИРШКО О.А., ПЛЁНКИН А.П.                                                                                    |     |
| Экспериментальные исследования потерь в атмосферном<br>оптическом канале связи.....                                      | 171 |

|                                                                                                                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ПОПОВ С.М., РЫБАЛТОВСКИЙ А.А., РЯХОВСКИЙ Д.В., ШИКИН А.С.,<br>ЛИПАТОВ Д.С., ЧАМОРОВСКИЙ Ю.К.                                                                                       |     |
| Перестраиваемый иттербиевый случайный волоконный лазер,<br>работающий в диапазоне длин волн 1070 нм.....                                                                           | 173 |
| ОСТРИКОВ С.А., ХАРАХОРДИН А.В., ФИРСТОВ С.В.                                                                                                                                       |     |
| Висмутовый волоконный лазер, излучающий на 1256 нм,<br>с выходной мощностью более 10 Вт.....                                                                                       | 175 |
| СУДЬИН А.В., ВОЛКОВ И.А., УШАКОВ С.Н., НИЩЕВ К.Н.                                                                                                                                  |     |
| Генерация синхронизованных двухволновых шумоподобных импульсов<br>в волоконном лазере с пассивной синхронизацией мод.....                                                          | 177 |
| ИВАНОВ В.Н., БУЛЫГА Д.В., САНДУЛЕНКО А.В., МАКАРОВ К.Н.,<br>ПОЛИЩУК Г.С., ДУКЕЛЬСКИЙ К.В., ЕВСТРОПЬЕВ С.К., БУЛЫЧОВ И.А.                                                           |     |
| Разработка кладдинга для мощных лазеров<br>на основе алюмоиттриевого граната.....                                                                                                  | 179 |
| РЕШЕТОВА М.В., ГАРМАТИНА А.А., КРИМАН Н.М.Р., КОНОВКО А.А.,<br>АСАДЧИКОВ В.Е., БЕРЕЗКИН В.В., МИНАЕВ Н.В.                                                                          |     |
| Экспериментальное исследование квазисинхронной генерации<br>второй гармоники в фотонно-кристаллических волокнах,<br>заполненных йодноватой кислотой.....                           | 181 |
| ВИНОКУРОВ М.В., ХАБИБУЛЛИН Р.А.                                                                                                                                                    |     |
| Влияние ширины терагерцового квантово-каскадного лазера с распределённой<br>обратной связью на его спектральные характеристики.....                                                | 183 |
| БЕЛЯЕВА В.С., ЧЕРМОШЕНЦЕВ Д.А.                                                                                                                                                     |     |
| Особенности режима затягивания в интегральных кольцевых<br>микрорезонаторах с учётом торцевых отражений волновода.....                                                             | 185 |
| ВИНОГРАДОВ Д.В., БЕЛОВ Д.А., ИКОННИКОВ Д.А., ХАБИБУЛЛИН Р.А.                                                                                                                       |     |
| Микродисковые квантово-каскадные лазеры терагерцового диапазона<br>на модах шепчущей галереи.....                                                                                  | 187 |
| ГОЛОДУХИНА И.Н., БЕЛЯЕВА В.С., ШИТИКОВ А.Е., ЧЕРМОШЕНЦЕВ Д.А.,<br>ДМИТРИЕВ Н.Ю.                                                                                                    |     |
| Динамика лазерного диода в режиме затягивания частоты<br>в системе с двумя оптическими микрорезонаторами.....                                                                      | 189 |
| БОРМИНЦЕВ А.А., ШАЙДУЛЛИН Р.И.                                                                                                                                                     |     |
| Исследование тепловых изменений коэффициентов перекачки<br>многомодового излучения в световодах с боковой накачкой.....                                                            | 191 |
| БОРОДЫНКИН И.И., БЫЧКОВ С.Б., ЗАЯЦ К.В., ИШТЕЕВ А.Р.,<br>КОНДРАТЕНКО В.С., ТИХОМИРОВ С.В.                                                                                          |     |
| Высококчувствительный калориметрический измерительный<br>преобразователь мощности лазерного излучения с приёмным элементом<br>из углеродных нанотрубок на кремниевой подложке..... | 193 |
| МОРОЗОВ Д.В., ВОРОБЬЕВ А.К., ДМИТРИЕВ Н.Ю., ШИТИКОВ А.Е.,<br>ЧЕРМОШЕНЦЕВ Д.А., БИЛЕНКО И.А.                                                                                        |     |
| Генерация низкошумных оптических частотных гребёнок<br>на основе интегральных микрорезонаторов из нитрида кремния.....                                                             | 195 |

|                                                                                                                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| МАКОВЕЦКАЯ Т.А., ХУНСЮНЬ Ю., ЗАВАЛИШИНА Л.Д., МАРКВАРТ А.А., УШАКОВ Н.А.                                                                                       |     |
| Применение квантово-вдохновленной интерферометрии для опроса распределённых волоконно-оптических датчиков вибраций.....                                        | 197 |
| ГРИШАЧЕВ В.В.                                                                                                                                                  |     |
| Низкочастотные шумы волоконно-оптического канала и борьба с ними.....                                                                                          | 199 |
| ЗЫКИНА А.А., ПЛЯСЦОВ С.А.                                                                                                                                      |     |
| Рефрактивный волоконно-оптический датчик качества топлива на основе поверхностного плазмонного резонанса и структуры MMF-SMF-MMF волокна.....                  | 201 |
| ТУРОВ А.Т., КРИШТОП В.В., КОНСТАНТИНОВ Ю.А.                                                                                                                    |     |
| Волоконно-оптический распределённый акустический датчик и его программно-аппаратная адаптация для биологических применений.....                                | 203 |
| ЗАВАЛИШИНА Л.Д., МАРКВАРТ А.А., БОБЫЛЕВА О.Г., ГРАЖДЯН А.Л., ФИЛОНОВ В.Д., ЛЮКОМОВИЧ Л.Б., УШАКОВ Н.А.                                                         |     |
| Отклик межмодового волоконно-оптического интерферометра на основе SNS-структуры на изменение параметров внешней среды.....                                     | 205 |
| ВЛАСОВ С.В., ИВАНОВ А.Д., МАЛЫШЕВ И.В., ПОПОВ М.В., ЧЕРМОШЕНЦЕВ Д.А.                                                                                           |     |
| Тактильные сенсоры на основе тейперных оптических волокон.....                                                                                                 | 207 |
| ГАЛАКТИОНОВ И.В., ТОПОРОВСКИЙ В.В., КОЛЕСНИКОВ О.В.                                                                                                            |     |
| Методы фокусировки лазерного излучения в волокно для задач беспроводной оптической связи.....                                                                  | 209 |
| ЕРОВЕНКО З.А., ПЕТРОВ А.В., МАРКВАРТ А.А., УШАКОВ Н.А.                                                                                                         |     |
| Улучшение пространственной разрешающей способности оптической когерентной томографии для визуализации внутренней структуры специальных оптических волокон..... | 211 |
| МАКОВЕЦКИЙ А.А., ПОПОВ С.М., РЯХОВСКИЙ Д.В., ЗАМЯТИН А.А.                                                                                                      |     |
| 3D-моделирование и экспериментальное исследование «резонансных» косых лучей в существенно многомодовом оптическом волокне.....                                 | 213 |
| КАЛЯЗИНА Д.В., ВОЛЬНОВА Д.А., ВАРЖЕЛЬ С.В., ЯКИМУК В.А., ЯНДЫБАЕВА Ю.И., МАГОМЕДОВА А.А., ДМИТРИЕВ А.А.                                                        |     |
| Исследование способа аподизации волоконных брэгговских решёток методом трансляции лазерного пучка.....                                                         | 215 |
| СУДАС Д.П., КУЗНЕЦОВ П.И.                                                                                                                                      |     |
| Нанесение нанопокровов на поверхность оптоволокна с наклонной брэгговской решёткой.....                                                                        | 217 |
| ОТРОХОВ С.Ю.                                                                                                                                                   |     |
| Волновые параметры и профиль показателя преломления в планарных W-световодах.....                                                                              | 219 |
| БЫКОВСКИЙ А.Ю.                                                                                                                                                 |     |
| Целевая сеть субагентов на базе многозначно-логической модели диалоговой коммуникации агентов.....                                                             | 221 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ВАСИЛЬЕВ С.В., СТЫРКИН И.С.<br>Поиск объектов на основе поля циркуляции<br>фазоэнергетического спектра изображения.....                                                                                                                                        | 223 |
| КРУГЛОВ С.К., ЛУПИН А.В.<br>Оптико-электронная измерительная система<br>с расширенным динамическим диапазоном.....                                                                                                                                             | 225 |
| РОГОВ С.А., ВЛАСОВА И.В.<br>Динамический диапазон многоканальных оптических систем<br>обработки сигналов.....                                                                                                                                                  | 227 |
| КОТОВ В.М., АВЕРИН С.В., БУЛЮК А.Н., КАРАЧЕВЦЕВА М.В.<br>Управляемый поворот плоскости поляризации с использованием<br>многофононной брэгговской дифракции.....                                                                                                | 229 |
| БОРИТКО С.В.<br>Повышение спектрального разрешения акустооптического монохроматора.....                                                                                                                                                                        | 231 |
| БУЛГАКОВ В.А., ТЕЛЕШЕВСКИЙ В.И.<br>Преимущества применения метода фазового сдвига в интерферометрическом<br>контроле.....                                                                                                                                      | 233 |
| БОРЕЙШО А.С., САВИН А.В.<br>Влияние неидеальности оптических элементов на работу<br>субдифракционного измерителя угловых отклонений лазерного пучка.....                                                                                                       | 235 |
| ЦЕЛОГОРОДЦЕВ К.А., АНТОНОВ И.О., КОТОВА С.П., ЛОСЕВСКИЙ Н.Н.<br>Световые поля с медленновращающейся поляризацией<br>для управления левитируемыми микрообъектами.....                                                                                           | 237 |
| НИКИТИН Н.В., ХАРАСОВ Д.Р., ГОСТИЛОВИЧ С.О., БЕНГАЛЬСКИЙ Д.М.,<br>ТРЕЩИКОВ В.Н.<br>Анализ применения различных типов нейронных сетей для объединения<br>данных распределённых температурных датчиков на основе рэлеевских<br>и рамановских рефлектометров..... | 239 |
| ПЯТИБРАТОВ К.А.<br>Разработка и исследование свойств оптической ячейки<br>хранения-накопления.....                                                                                                                                                             | 241 |
| КЕРОВ А.А., КОЗЛОВ А.В., ЧЕРЁМХИН П.А., РОДИН В.Г.<br>Анализ метрик и методов фильтрации для идентификации камер<br>по портретам пространственных шумов.....                                                                                                   | 243 |
| ПОТАТУРКИН О.И., ОРЛОВ С.И., УЗИЛОВ С.Б.<br>Исследование эффективности мульти- и гиперспектральных систем<br>признаков при классификации объектов реальных сцен.....                                                                                           | 245 |
| СКИДАНОВ Р.В., ДОСКОЛОВИЧ Л.Л., ХАНЕНКО Ю.В., ПРОНИН А.С.,<br>МОРОЗОВ А.Е., СОРОКИН Д.М.<br>Дифракционная нейронная сеть с программно-задаваемой нелинейностью<br>в 4F-системе.....                                                                            | 247 |
| ПОГОДА А.П., СЕМЕНТИН В.В., БОРЕЙШО А.С.<br>Визуализация профиля поверхности микрометровых эталонов<br>посредством цифровой двухдлинноволновой голографии.....                                                                                                 | 249 |



|                                                                                                                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ДЕНИСОВ Д.Г.<br>Комплекс оптико-электронного оборудования для диагностики качества<br>поверхностей ангстремного уровня астрономических зеркал,<br>лазерных и оптических изделий.....               | 251 |
| МАНУЧАРОВ Д.Р., ПАВЛОВ П.В.<br>Лазерная методика экспресс-диагностики биозагрязнения<br>авиационного топлива.....                                                                                  | 253 |
| КОХАНОВ А.В., НОВИКОВ И.Н., ЕРОФЕЕВА А.А., БЕЛОТЕЛОВ Г.С.,<br>СУТЫРИН Д.В.<br>Измерение длин волн в оптическом диапазоне при помощи<br>спекл-паттернов, сформированных на интегрирующей сфере..... | 255 |
| АХМЕДЖАНОВ И.М., БАРАНОВ Д.В., ТИХОНЕВИЧ О.В., УСИЕВИЧ Б.А.<br>Эффект спектрального переключения в оптической схеме<br>с изменяемой апертурой.....                                                 | 257 |
| ПУТИЛИН Н.А., КОПЁНКИН С.С., ПУТИЛИН А.Н., БОРОДИН Ю.П.,<br>ДУБЫНИН С.Е.<br>Волноводная мультипликация лучей в схемах с наложенными<br>и двухсторонними дифракционными решётками.....              | 259 |
| ГАТАТДИНОВ Т.А., РЫМОВ Д.А., ЗЛОКАЗОВ Е.Ю.<br>Анализ способов формирования голографических изображений<br>в системе с голографическим волноводом.....                                              | 262 |
| КАШАПОВА Д.И., ПРОКОПОВА Д.В., КОТОВА С.П.<br>Качество формирования спиральных пучков света<br>голографическим методом.....                                                                        | 264 |
| ЧЕРНЫХ А.В., ГРЕСЬКО В.Р., РЕЗЦОВ Т.В., СЕРГЕЕВ М.М., ПЕТРОВ Н.В.<br>Разработка поляризационного голографического микроскопа<br>для исследований анизотропии плёнок ZnO:Ag.....                    | 266 |
| ИВАНОВ П.А.<br>Некоторые типы инвариантных корреляционных фильтров в задачах<br>различения изображений для различных видов искажений.....                                                          | 268 |
| ПАВЛЕНКО Д.В., СТАРИКОВ Р.С., УШАКОВ Ф.А.<br>Нейросетевая классификация изображений по сигналам свёртки,<br>формируемым оптико-цифровой системой пространственной фильтрации...                    | 270 |
| ВЯЗОВЫХ М.В., КОЗЫРЕВ В.Д., КОВТУН А.А., ВЕРНИГОР Н.А., КЛЮЕВ В.А.<br>Нейросетевой алгоритм повышения вероятности распознавания<br>перемещающихся объектов в лидарных системах.....                | 272 |
| ВОЛКОВ А.А., КОЗЛОВ А.В., ЧЕРЁМХИН П.А.<br>Исследование нейросетевых подходов при извлечении<br>шумовых характеристик матричных фотосенсоров.....                                                  | 274 |
| САГАТЕЛЯН Г.Р., ПИСКУНОВА Е.Р., КУЗНЕЦОВ А.С.<br>Сравнение RGB- и XYZ методов оценки цвета изображения.....                                                                                        | 276 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| МУТИЛИН С.В., КАПОГУЗОВ К.Е., МАНЦУРОВ Н.Д., ЯКОВКИНА Л.В.,<br>КИЧАЙ В.Н., ГАЙДУК А.Е., ВОЛОШИН Б.В., ТУМАШЕВ В.С., СЕЛЕЗНЕВ В.А.<br>Нанокристаллы диоксида ванадия с фазовым переходом полупроводник-<br>металл для динамического управления оптическим излучением..... | 278 |
| ВАСИЛЮК Я.Д., МЕДВЕДЕВА Е.А., БАРАНОВ М.А.<br>Фазовая задержка света в тонких плёнках аланина,<br>напылённых ультразвуком с разных расстояний.....                                                                                                                       | 280 |
| БУХАРОВ Д.Н., ХУДАЙБЕРГАНОВ Т.А.<br>Моделирование оптических свойств искусственного алмаза<br>в приближении фотонный кристалла с NV-центрами.....                                                                                                                        | 282 |
| ФЕДОРОВА И.А., ЮРОВ В.Ю., БОЛЫШАКОВ А.П., ПОПОВ М.Ю.,<br>РЫЖКОВ С.Г., ПИВОВАРОВ П.А., РАЛЬЧЕНКО В.Г.<br>Применение спектроскопии комбинационного рассеяния для контроля<br>температуры монокристаллов алмаза в процессе синтеза<br>в СВЧ-плазмохимическом реакторе.....  | 284 |
| КУЧЕРЕНКО М.Г., РУСИНОВ А.П.<br>Влияние заряда наночастицы на кросс-аннигиляцию молекул синглетного<br>кислорода с триплетными центрами в её полимерном окружении.....                                                                                                   | 286 |
| КАБДИЕВА А.У., РОЖКОВА К.С., МЕНДИБАЕВА А.Ж., ЖУБАТ А.С.,<br>БЕКЖАН Н.А.<br>Влияние наночастиц MoS <sub>2</sub> на распределение тока и эффективность<br>перовскитных солнечных элементов на основе PEDOT PSS.....                                                       | 288 |
| ШУТКИН Г.А., ПАВЛОВА М.Д., ЛАМКИН И.А., ТАРАСОВ С.А.<br>Исследование спектральных характеристик органической<br>фоточувствительной структуры на основе РЗНТ:ЕН-IDTBR.....                                                                                                | 290 |
| МУСАБЕКОВА А.К., АЙМУХАНОВ А.К., РУСТЕМОВА А., РАШИДКЫЗЫ М.,<br>БАКИЕВ Д.К., МУРАТОВА К.К.<br>Влияние разных спиртовых растворителей на морфологию<br>и структуру плёнок SnO <sub>2</sub> .....                                                                          | 292 |
| НАЛБАНДЯН В.М., КУЧЕРЕНКО М.Г.<br>Генерационные характеристики системы «молекула - металлическая<br>наночастица со слоем из J-агрегатов» .....                                                                                                                           | 294 |
| АЙМАГАМБЕТОВА А.А., ИБРАЕВ Н.Х.<br>Сравнительный анализ плазмонного усиления ксантеновых красителей<br>наночастицами серебра и золота.....                                                                                                                               | 296 |
| ЯКУШОВА Н.Д., СИТНИКОВА М.Г., КАРМАНОВ А.А.<br>Исследование оптических свойств фотокаталитических плёнок ZnO:Fe:Bi,<br>сенсibilизированных красителем.....                                                                                                               | 298 |
| ЗИЯТ А.З., БЕЙСЕМБЕКОВ М.К., ЗЕЙНИДЕНОВ А.К., СЫДЫХ Б., РАХИМ А.<br>Исследование оптических свойств бислойных плёнок NiOx/фталочианина...                                                                                                                                | 300 |
| АВЕРИН С.В., ЛУЗАНОВ В.А., ЖИТОВ В.А., ЗАХАРОВ Л.Ю., КОТОВ В.М.<br>Оптические свойства нанометровых эпитаксиальных плёнок<br>оксида никеля.....                                                                                                                          | 302 |

|                                                                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ПАУКОВ М.И., ЯКУБОВСКИЙ Д.И., МАРАКУЛИН А.С., САН Ш., ЖАНГ Я.,<br>БУРДАНОВА М.Г.                                                          |     |
| Зависимость глубины модуляции терагерцового излучения и её скорости<br>от толщины для ультратонких сплошных плёнок золота.....            | 304 |
| АБЕУОВ Д.Р., АЙМУХАНОВ А.К., ЗЕЙНИДЕНОВ А.К., РУСТЕМ А.Ж.                                                                                 |     |
| Усиление электрон-фотонного взаимодействия<br>на границе кремний-золото.....                                                              | 306 |
| ГОРЯЕВ М.А.                                                                                                                               |     |
| Влияние красителя на фотовольтаический эффект<br>в кремниевой <i>p-n</i> структуре.....                                                   | 308 |
| ЛЕБЕНКОВА С.К., МИЛЬШИНА Л.Д.                                                                                                             |     |
| Влияние легирования редкоземельными элементами на структуру<br>и колебательные характеристики щёлочно-земельных вольфраматов.....         | 310 |
| МИЛЬШИНА Л.Д., ЛЕБЕНКОВА С.К.                                                                                                             |     |
| Исследование структурных характеристик твёрдых растворов<br>на основе вольфраматов стронция и кальция.....                                | 312 |
| БАРИНОВА О.П., КНЯЗЬКИН Д.Д., РУНИНА К.И.                                                                                                 |     |
| Синтез и люминесцентные свойства пентаалюмината лития,<br>активированного ионами железа (111).....                                        | 314 |
| ДОМАРЕВ С.Н., ОСКОЛКОВА Т.О., МОИСЕЕВА Е.О., ОРЛОВА А.О.                                                                                  |     |
| Фотоиндуцированные изменения в спектрах магнитного кругового<br>дихроизма наночастиц оксидов железа.....                                  | 316 |
| БЕЛОУСОВА П.О., КУЗЬМИН Н.Н., МАЛЬЦЕВ В.В., ИНЬ Л.Х., МОРОЗОВ И.А.                                                                        |     |
| Спектроскопическое исследование бората $\text{DyCr}_3(\text{BO}_3)_4$ .....                                                               | 318 |
| ИЗМАЙЛОВА Н.В., САМСОНОВА Л.Г., ГАДИРОВ Р.М.                                                                                              |     |
| Фотогенерация кислоты эксимерной лампой $\text{XeCl}$ (308 нм) .....                                                                      | 320 |
| ГЛУХОЕДОВА М.А., ЕВСТРОПЬЕВ С.К.                                                                                                          |     |
| Структура и фотокаталитические свойства системы $\text{ZnO-Cr}$ .....                                                                     | 322 |
| КАРПАЧ П.В., ВАСИЛЮК Г.Т., МАСКЕВИЧ А.А., ГЛЕБОВИЧ Т.С., АЙТ А.О.,<br>МАСКЕВИЧ С.А.                                                       |     |
| Фотохромные нанокompозиты на основе наночастиц $\text{Ag}$<br>и молекул диарилэтена в полимерных плёнках.....                             | 324 |
| ЛАНТУХ Ю.Д.                                                                                                                               |     |
| Сенсибилизированное просветление плёнки «Биохром» .....                                                                                   | 326 |
| ГЕЙНЦ Ю.Э., ПАНИНА Е.К.                                                                                                                   |     |
| Численное исследование антиотражающих свойств наноструктурированных<br>покрытий из $\text{TiO}_2$ в применении к солнечным элементам..... | 328 |
| КОЛИСНИЧЕНКО В.В., ДАЙБАГЕ Д.С., ДАЙБАГЕ Д.М., ОСАДЧЕНКО А.В.,<br>ЗАХАРЧУК И.А., АМБРОЗЕВИЧ С.А., СЕЛЮКОВ А.С.                            |     |
| Моделирование температурной зависимости спектров люминесценции<br>наноматериалов.....                                                     | 330 |
| БОЛТЕНКО А.В., НАЗАРЕНКО Е.С., РИДЕР М.А., ОРЛОВА А.О.                                                                                    |     |
| Люминесцентные свойства двумерных нанокристаллов селенида кадмия<br>при криогенных температурах.....                                      | 332 |

|                                                                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ИВАНОВА В.С., ОСАДЧЕНКО А.В., РЫЖОВ А.В., ДАЙБАГЕ Д.С.,<br>ЗАХАРЧУК И.А., ДАЙБАГЕ Д.М.                                                |     |
| Влияние окружения на люминесцентные свойства комплексов $\text{Eu}^{3+}$ :<br>определение параметров Джадда–Оффелта.....              | 334 |
| КРОЛЬ И.М., БОРОВИКОВ В.Н., СМАКОТИНА В.В., КАРИМОВА О.В.                                                                             |     |
| Синтез $\alpha\text{-Zn}_2\text{SiO}_4\text{:Mn}^{2+}$ методом MSS и его люминесцентные свойства.....                                 | 336 |
| ФАТЕЕВ А.Д., ДЕВИЦКИЙ О.В.                                                                                                            |     |
| Новые полупроводниковые материалы на основе соединений III-V-Vi<br>для приборов ИК-диапазона.....                                     | 338 |
| ШАТРОВ К.Д., АНДРЕАДИ А.В., МАРТЫНОВ И.Л., ЧИСТЯКОВ А.А.                                                                              |     |
| Изготовление и характеристика краевых фильтров из пористого кремния ...                                                               | 340 |
| ЧМЕРЕВА Т.М., ШИХАВЦОВ М.А.                                                                                                           |     |
| Влияние плазмонной полусферической наночастицы<br>на дезактивацию квантового излучателя.....                                          | 342 |
| ХОПЁРСКИЙ А.Н., НАДОЛИНСКИЙ А.М., КОНЕЕВ Р.В.                                                                                         |     |
| Двухфотонная ионизация К-оболочки тяжёлого атомного иона.....                                                                         | 344 |
| КОРОВАЙ О.В.                                                                                                                          |     |
| Влияние учёта многофотонных переходов на закон дисперсии<br>четырёхуровневого атома с эквидистантным энергетическим спектром.....     | 346 |
| ГАВРИЛОВЕЦ В.А., ГАВРИЛОВЕЦ Д.А., КУЛАГИНА М.А., СУРИНА М.А.,<br>ЧЕБАКОВА С.А., ФИЛАТОВ В.В.                                          |     |
| Спонтанное нарушение симметрии при коллапсе поляритонного<br>конденсата в фотонном кристалле.....                                     | 348 |
| ВАСИЛЬЕВА О.Ф.                                                                                                                        |     |
| Временная эволюция плотности диполяритонов в случае, когда в системе<br>в начальный момент времени присутствуют все квазичастицы..... | 350 |
| РЫЖОВ И.В., ИВАНОВ Г.А.                                                                                                               |     |
| Аттосекундное сверхилучение трёхуровневых ионов $\text{Pr}^{3+}$<br>синтезируемых в перовскитовые квантовые точки.....                | 352 |
| СЕМЕНОВА Л.Е.                                                                                                                         |     |
| Резонансное гиперкомбинационное рассеяние на LO-фононах<br>в кристалле $\text{ZnS}$ .....                                             | 354 |
| КОТОВА А.Д., ИСМАИЛ А., ОРЕХОВ И.О., САЗОНКИН С.Г.,<br>ФЕДОРЕНКО А.Ю., ДВОРЕЦКИЙ Д.А., КАРАСИК В.Е.                                   |     |
| Исследование процесса генерации когерентного суперконтинуума<br>на основе солитонных молекул высокого порядка.....                    | 356 |
| СЕМЕНОВА Л.Е.                                                                                                                         |     |
| Двухфононное резонансное комбинационное рассеяние света<br>в кристалле $\text{CdSe}$ .....                                            | 358 |
| У Цз., ЛИ Ч., СМЕРНОВ А.М., ИНЬ Ю.                                                                                                    |     |
| Самосогласованная нелинейность третьего порядка<br>в композитах $\text{CdSe/ZnS-MOF}$ .....                                           | 360 |
| БАГРОВ А.Р.                                                                                                                           |     |
| Динамика перепутывания трёх атомов Джейнса–Каммингса.....                                                                             | 362 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| АСТАШКЕВИЧ С.А.<br>Зависимость ионного состава цезийсодержащей фотоплазмы<br>от её условий.....                                                                                                                                                                          | 364 |
| АСТАШКЕВИЧ С.А.<br>Исследование пространственной неоднородности фотоплазмы<br>в парах щелочных металлов.....                                                                                                                                                             | 366 |
| ЛИ Ч., ТЕБЕНЕВА Т.С., ЛОБАНОВ В.Е., ЧЕРМОШЕНЦЕВ Д.А.,<br>БИЛЕНКО И.А., ШИТИКОВ А.Е.<br>Переключение режимов генерации платионов в высокочастотном $Si_3N_4$<br>микрорезонаторе в режиме затягивания.....                                                                 | 368 |
| МИНИН И.В., МИНИН О.В.<br>Фотонный крючок на основе целенаправленно нарушенных<br>пространственных симметрий частицы Мухалинга.....                                                                                                                                      | 370 |
| КУЗНЕЦОВ И.О., КАРЦЕВ П.Ф.<br>Модель релаксации сверхпроводящего состояния после импульсного<br>оптического возбуждения с учётом неравновесных фононов.....                                                                                                              | 372 |
| КОЖЕВНИКОВ В.А., АММОСОВ А.П.<br>Анализ положительного столба разряда постоянного тока в лазерной трубке<br>изменяющегося диаметра для двухкомпонентной газовой смеси.....                                                                                               | 374 |
| ГАВРИШ С.В., ПОТАПЕНКО А.О., ЧИЛИКИНА П.А.<br>Создание эффективных импульсных ламп на основе<br>короткодугового и капиллярного разрядов для УФ-установок.....                                                                                                            | 376 |
| МЕШКОВ М.Н., СИДОРЮК О.Е., ДОРОФЕЕВ А.А.<br>Применение лазерной резки в технологиях формообразования<br>прецизионных керамических пружин.....                                                                                                                            | 378 |
| ЧИНЬ Н.Х., БЕЛЯНОВА Е.Ю., МИЛТО А.Ю., ПАТАПОВИЧ М.П.<br>Особенности взаимодействия лазерного излучения с поверхностью<br>многокомпонентного сплава.....                                                                                                                  | 380 |
| НИКОЛАЕВА И.Н., РОГОЖНИКОВ Г.С.<br>Исследование характеристик терагерцового излучения, генерируемого<br>в ультратонких спинтронных гетероструктурах Pt/Fe.....                                                                                                           | 382 |
| НАЗАРОВА Т.А., ЕРШКОВ М.Н., ШЕПЕЛЕВ А.Е., СОЛОХИН С.А.<br>Внутррезонаторное удвоение частоты генерации композитного<br>керамического YAG: $Nd^{3+}$ / YAG: $Cr^{4+}$ лазера.....                                                                                         | 384 |
| КОРШУНОВ А.А., МОЖАЕВА М.Д., ГАРМАТИНА А.А., АСАДЧИКОВ В.Е.,<br>МАРЕЕВ Е.И., МИНАЕВ Н.В.<br>Влияние фемтосекундного предимпульса при создании<br>микрофокусного лазерно-плазменного рентгеновского источника<br>на основе регенеративного фемтосекундного усилителя..... | 386 |
| АСТАШКЕВИЧ С.А., ГОРДЕЕВ С.В., МАШЕК И.Ч., ХОРОНЖУК Р.С.,<br>ЧЕКУНОВ И.В.<br>Исследование эффективности ламповых источников<br>для многоканальной накачки в стандартах частоты.....                                                                                      | 388 |

|                                                                                                                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| АСТАШКЕВИЧ С.А., ГОРДЕЕВ С.В., МАШЕК И.Ч., ХОРОНЖУК Р.С.,<br>ЧЕКУНОВ И.В.                                                                                                 |     |
| Использование интерферометра Фабри–Перо<br>при лазерной накачке стандарта частоты.....                                                                                    | 390 |
| ЦЕКИН А.С., ГУРСКИЙ Д.С., ИШКИНЯЕВ Э.Д., ПЕТРОВСКИЙ В.Н.                                                                                                                  |     |
| Оценка эффектов термокапиллярного движения и плазменного<br>экранирования при численном моделировании наносекундной<br>лазерной абляции монокристаллического кремния..... | 392 |
| ЧИНЬ Н.Х., ЩУКО А.В., ТИТКО К.Д., ПАТАПОВИЧ М.П.                                                                                                                          |     |
| Определение состава синтетических материалов методом лазерной<br>атомно-эмиссионной спектроскопии.....                                                                    | 394 |
| КОВАЛЕНКО А.Ф.                                                                                                                                                            |     |
| Критерий термостойкости пластины при импульсном лазерном отжиге<br>с учётом отражения от тыльной поверхности.....                                                         | 396 |
| ЕГОРОВ А.Н., ДЕРИМЕДВЕДЬ Д.К., ЕПИФАНОВ Е.О., МИНАЕВ Н.В.                                                                                                                 |     |
| Разработка методов фемтосекундного лазерного формирования наночастиц<br>металлов в оптических прозрачных материалах и его реализация<br>на практике.....                  | 398 |
| ФЕДОТКИН М.Г., ТЕЛЬМИНОВ Е.Н., СОЛОДОВА Т.А., БЕРДЫБАЕВА Ш.Т.,<br>ГАДИРОВ Р.М.                                                                                            |     |
| Лазерное излучение в органических активных волноводах.....                                                                                                                | 400 |
| ЛЕБЕДЕВ Н.Р., ЕПИФАНОВ Е.О., МИНАЕВ Н.В.                                                                                                                                  |     |
| Увеличение производительности технологии двухфотонной полимеризации<br>и её аппаратная реализация на отечественной компонентной базе.....                                 | 402 |
| ЧАБУРКИН Д.А., КОТОВА С.П., СОФЬИН А.С., НЕУПОКОЕВА А.В.                                                                                                                  |     |
| Фазовая задержка дегидратированных образцов плазмы крови<br>для определения заболеваний нейродегенеративного характера.....                                               | 404 |
| ЧИНЬ Н.Х., ВЛАСЕВИЧ В.Д., ПАТАПОВИЧ М.П.                                                                                                                                  |     |
| Изучение элементного состава волос человека с помощью<br>сдвоенных лазерных импульсов.....                                                                                | 406 |
| ЗУБАРЕВА С.Р., ЗЮБИН А.Ю., САМУСЕВ И.Г.                                                                                                                                   |     |
| Метод упорядочивания и обработки спектров комбинационного рассеивания<br>многокомпонентных объектов с использованием машинного обучения.....                              | 408 |
| РЯБОВ Н.А., ШУЛЕПОВ П.В., ВОЛОВА Л.Т., ТИМЧЕНКО Е.В.,<br>ТИМЧЕНКО П.Е., ИВАНОВ С.С.                                                                                       |     |
| Идентификация коллагенсодержащего геля в составе эндопротезов<br>сеток с помощью рамановской спектроскопии.....                                                           | 410 |
| ВОЙТЕШОНОК Ю.В., ШИТЦ Д.В.                                                                                                                                                |     |
| Светодиодная лампа для УФ в фототерапии кожных заболеваний.....                                                                                                           | 412 |
| ЧУРСИНА Ю.А., ЕГОРОВ А.Н., АШИХМИН Д.И., ШАЛЕНОВ А.С.,<br>МИНАЕВ Н.В.                                                                                                     |     |
| Разработка метода и его аппаратной реализации для высокоэффективного<br>лазерно-индуцированного переноса живых клеток спор и фрагментов<br>мицелия грибов.....            | 414 |

|                                                                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ХАМИНА К.А., ТИМЧЕНКО Е.В., ТИМЧЕНКО П.Е., БАЖУТОВА И.В., ГЛУБОКОВ Д.Г.                                                                            |     |
| Рамановская спектроскопия для диагностики состояния<br>бедренной части кости при флегмоне.....                                                     | 416 |
| ШАЛЕНОВ А.С., МИНАЕВ Н.В., АШИХМИН Д.И., ЮСУПОВ В.И.                                                                                               |     |
| Технология и аппаратный комплекс для точного лазерно-индуцированного<br>переноса единичных клеток.....                                             | 418 |
| ФРАНЦУЗОВА Д.М., ТИМЧЕНКО Е.В., ТИМЧЕНКО П.Е., БАЖУТОВА И.В., ГЛУБОКОВ Д.Г.                                                                        |     |
| Рамановская спектроскопия для оценки минералоорганического<br>состава костной ткани челюсти после костной пластики.....                            | 420 |
| ШУЛБАЕВА Д.С., КОСТРОМЫКИНА В.В., РОГОЖНИКОВ Г.С.                                                                                                  |     |
| Особенности применения метода спектральных отпечатков<br>в задачах дифференцирования биологических тканей<br>по их оптическим характеристикам..... | 422 |
| ТИМЧЕНКО П.Е., ВОЛОВ А.Д., ВОЛОВА Л.Т., ТИМЧЕНКО Е.В., ЧЕРНУХИН А.А.                                                                               |     |
| Рамановская спектроскопия для оценки состава деионизированной воды.....                                                                            | 424 |
| КОЛЕСНИК Я.В., ЗИМИН С.И.                                                                                                                          |     |
| Исследование радиационной стойкости различных типов оптических волокон<br>и компонентов ВОЛС в условиях моделированного облучения АЭС.....         | 426 |
| ТОРУБКА В.Д.                                                                                                                                       |     |
| Исследование современных тенденций перехода на оборудование<br>отечественного производителя в сетях пакетной передачи данных.....                  | 428 |
| КОСОВА Ю.А., АВТАНДИЛОВ К.Ш.                                                                                                                       |     |
| Наукометрический анализ перспектив развития полых<br>и многосердцевинных световодов для квантовых коммуникаций.....                                | 430 |
| ГАНАКИН Н.Р., САЛЕЕВ А.Р., СИМОНОВ И.М., ЯРЫГИН М.А., ПАВЛОВ С.В.                                                                                  |     |
| Влияние поперечной точечной силы на передачу сигнала<br>оптоволоконного кабеля.....                                                                | 432 |
| АНПИЛОВ В.С., ШАЙДУЛЛИН Р.И., ТЕЗАДОВ Я.А., ГОЛУБЕВ М.А.                                                                                           |     |
| Расширенная GN-модель влияния нелинейных эффектов<br>на оптический сигнал в когерентных системах связи.....                                        | 434 |
| БАХУС А.В., КАЗАНЦЕВ С.Ю., НАНИДЖАНИЯ А.К., ЯРЫГИН М.А.                                                                                            |     |
| Влияние внешних магнитных и акустических полей на квантовое<br>распределение ключей в многосердцевинном оптическом волокне.....                    | 436 |
| ЗАГИРОВ Т.Р., ЗЛОКАЗОВ Е.Ю., КАЗЬМИН М.И., РЫМОВ Д.А., СТАРИКОВ Р.С., ШИФРИНА А.В.                                                                 |     |
| Улучшение сигналов аналогового оптического тракта с прямой модуляцией<br>с применением нейронных сетей.....                                        | 438 |
| ГАЛАКТИОНОВ И.В., ЛЕПИЛИН А.В., ТОПОРОВСКИЙ В.В., КОЛЕСНИКОВ О.В.                                                                                  |     |
| Компенсация атмосферных искажений в системах<br>оптической беспроводной связи.....                                                                 | 440 |

|                                                                                                                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ЕВСЮХИН З.Д., КАЗЬМИН М.И., НЕБАВСКИЙ В.А., НЕНАШЕВ Т.Д.,<br>ПОЧТАРЕВ И.С., СТАРИКОВ Р.С.                                                                         |     |
| Особенности характеристики аналоговых оптических трактов с цифровым<br>выходом, реализованных с применением различных фотодиодов.....                             | 442 |
| БУРМИСТРОВ Е.Р., ПЧЕЛКИНА Н.В.                                                                                                                                    |     |
| Исследование спектра затуханий С-диапазона атмосферной<br>оптической связи.....                                                                                   | 444 |
| СЕМКИВ М.Т., ЗЛОКАЗОВ Е.Ю.                                                                                                                                        |     |
| Разработка метода стабилизации сигнала выборки для систем<br>пассивного умножения частоты следования импульсов<br>фотонных аналого-цифровых преобразователей..... | 446 |
| ПЧЕЛКИНА Н.В., ЧИЖ С.А.                                                                                                                                           |     |
| Влияние жидких осадков на ослабление сигнала<br>в атмосферном оптическом канале.....                                                                              | 448 |
| ГАЛАКТИОНОВ И.В., МЕСЯЦЕВ М.А., ТОПОРОВСКИЙ В.В.,<br>КОЛЕСНИКОВ О.В.                                                                                              |     |
| Алгоритмы коррекции волнового фронта для повышения пропускания<br>в атмосферных оптических линиях связи.....                                                      | 450 |
| ВОЛЖАНКИН Д.В., ШВЕЦ Н.А., ЗИМИН С.И.                                                                                                                             |     |
| Расчёт параметров атмосферно-оптической линии связи на примере горной<br>местности между сёлами Усучай и Куруш в Докузпаринском районе.....                       | 452 |
| ХЛОПЦЕВА Д.С., ШВЕЦ Н.А., ЗИМИН С.И.                                                                                                                              |     |
| Проектирование и расчёт параметров атмосферно-оптической линии связи<br>на примере химического предприятия АО «Сибур-Нефтехим» .....                              | 454 |
| ПАВЛОВА Е.К., ОКАТАЯ М.А., ЗИМИН С.И.                                                                                                                             |     |
| Использование атмосферной оптической линии связи в арктической зоне....                                                                                           | 456 |
| ЗЛОКАЗОВ Е.Ю., НЕНАШЕВ Т.Д., СТАРИКОВ Р.С.                                                                                                                        |     |
| Численное моделирование электрооптических схем генерации<br>Comb-сигналов в системах микроволновой фотоники.....                                                  | 458 |
| ГАЛАКТИОНОВ И.В., ЛЯШЕНКО А.В., ТОПОРОВСКИЙ В.В.,<br>КОЛЕСНИКОВ О.В.                                                                                              |     |
| Методы ручной плоской полировки многомодовых ферул и способы<br>устранения смещения апекса в оптических разъёмах.....                                             | 460 |
| ПОПОВ И.А., АРТЕМОВ Д.Е., КОНДАКОВ А.А., ТРЕЩИКОВ В.Н.                                                                                                            |     |
| Исследование температурной зависимости параметров высокочастотных<br>микромольцевых резонаторов на фотонных интегральных схемах.....                              | 462 |
| ЖОРОВ П.В., ПЕТРОВ В.А., ЗИМИН С.И.                                                                                                                               |     |
| Аналитическая оценка применения LI-FI в гибридных корпоративных<br>инфраструктурах.....                                                                           | 464 |
| ПАНТЕЛЕЕВА Е.П., МЕЛЬНИКОВА Е.А., ГОРБАЧ Д.В., ТОЛСТИК А.Л.,<br>СЛЮСАРЕНКО С.С., КАРАБЧЕВСКАЯ А.                                                                  |     |
| Жидкокристаллическая зонная пластинка Френеля<br>для определения фазовой топологии оптических вихрей.....                                                         | 466 |



СТЕПАНОВ И.Г., ЧЕРНЫХ А.В., РЕЗЦОВ Т.В., ОРЛОВА Т.Н.,  
ПЕТРОВ Н.В.

Исследование хроматических свойств самоорганизующихся структур  
в хиральных нематических жидких кристаллах.....468

РАХИМОВА У.Дж., ЕРОВ М.Н., МАХСУДОВ Б.И., ЭГАМОВ М.Х.

Концентрационная зависимость поверхностно-активных веществ  
в жидкокристаллических плёнках с полимерной дисперсией.....470

ПРОСКУРЯКОВ Д.А., ЧУБАРОВ Д.М., АЛТУХОВ Ю.А., РАСТРЫГИН Д.С.,  
ДОЛГИРЕВ В.О., ШАРАНГОВИЧ С.Н.

Исследование процесса голографического формирования чирпированных  
двухслойных КПЖК дифракционных структур.....472

МАРИНИЧЕВА К.А., ИВАНОВА А.И., ИВАНОВ А.М., КАПЛУНОВ И.А.

Влияние облучения электронами на оптические свойства кристаллов  
кремния и германия.....474

ЗЛОБИН А.О., ФАЛЬКОВ Д.Я., КАЛИМУЛЛИН Э.Р., БУРИМОВ Н.И.,  
ШАНДАРОВ С.М., ШМИДТ А.А., ЮДИН Н.Н., ПОДЗЫВАЛОВ С.Н.,  
БРЮШИН И.А., СОКОЛОВ И.А.

Температурная зависимость темновой проводимости кристалла  $\text{ZnGeP}_2$ .....476

ТОККО О.В., ЗАЗУЛЯ Е.В., КАДЕТОВА А.В., ПАЛАТНИКОВ М.Н., ТИТОВ Р.А.

Исследование особенностей структуры кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}:\text{B}$ .....478

ШАНДАРОВ С.М., КИСТЕНЕВА М.Г., АКРЕСТИНА А.С., КОЛМАКОВ А.А.,  
АНИСИМОВ Р.И., КОМОВ Э.В.

Аппроксимация спектральных зависимостей оптического поглощения  
в кристаллах  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ .....480

КОСТРИЦКИЙ С.М., ФЕДОРОВ В.А., СЕВОСТЬЯНОВ О.Г., ЧИРКОВА И.М.

Исследование канальных протоно-обменных волноводов  
в кристаллах  $\text{LiNbO}_3$ .....482

АКРЕСТИНА А.С., КИСТЕНЕВА М.Г., КОМОВ Э.В., АПАСЬЕВА А.Е.,

БУДУЕВА Ч.Б., САЛЧАК А.Х., МИШЕЛЬ М.

Связь спектров оптического поглощения с концентрацией ионов  $\text{Cu}^+$  и  $\text{Cu}^{2+}$   
в диффузионно-легированных кристаллах ниобата лития.....484

СМИРНОВ М.В., СИДОРОВ Н.В., ПАЛАТНИКОВ М.Н., КАДЕТОВА А.В.,  
ТОККО О.В., ПАЛАТНИКОВА О.В., ПЯТЫШЕВ А.Ю.

Структура, дефекты, люминесцентные свойства и особенности роста  
Ег-легированных кристаллов ниобата лития.....486

УМАРОВ М.Ф., КАЮМЗОДА А.К.

Мягкая мода в пьезоэлектрическом кристалле  $\text{Pr}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$ .....488

ДУДКА А.П., ГОЛОВИНА Т.Г., КОНСТАНТИНОВА А.Ф., БУТАШИН А.В.,  
КАСИМОВА В.М., КОЗЛОВА Н.С., ЗАБЕЛИНА Е.В.<sup>1</sup>

Температурная зависимость структуры и оптических свойств кристаллов  
семейства лангасита  $(\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x)_3\text{Ta}_{0.5}\text{Ga}_{5.5}\text{O}_{14}$ .....490

УМАРОВ М.Ф., МАХМУДЗОДА А.М.

Суперлюминесценция в фармацевтических препаратах.....492

|                                                                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ДАВЫДОВСКАЯ В.В., НАВНЫКО В.Н., БЛОЦКАЯ Д.С., ФЕДОРОВА А.В., ЗАВАЛЕЙ С.Н.                                                                           |     |
| Условия наблюдения эффективного энергообмена между синфазными двумерными световыми пучками в фоторефракционном кристалле класса симметрии 4 мм..... | 494 |
| БУЧИНСКАЯ И.И., КАРИМОВ Д.Н., СОРОКИН Н.И.                                                                                                          |     |
| Конгруэнтно-плавящиеся многокомпонентные монокристаллы фторидных твёрдых растворов со структурой флюорита как оптические среды.....                 | 496 |
| УСТИНОВ К.А., ДОНСКИХ В.К., БОБЫЛЕВА Е.А.                                                                                                           |     |
| Исследование влияния поверхностных дефектов на характеристики оптических планарных волноводов на основе нитрида кремния.....                        | 498 |
| КОЧЕРГИНА О.В., ЗЕНЕВИЧ А.О., МУХУРОВ Н.И.                                                                                                          |     |
| Выбор люминофора для визуализаторов.....                                                                                                            | 500 |
| ДЯДЕНКО М.В.                                                                                                                                        |     |
| Боросиликатные стёкла для волоконной оптики.....                                                                                                    | 502 |
| НИФОНТОВА Е.В., ШЕВЦОВА А.Д., ВАХРУШЕВ А.С., ШАРОНОВА Ю.О., ПЕРМИНОВ А.В., АЗАНОВА И.С.                                                             |     |
| Радиационно стойкие активные оптические волокна, сохраняющие поляризацию: краткий литературный обзор.....                                           | 504 |
| БРАЖНИКОВ М.К., ПАВЛОВ В.И., ХАТЫРЕВ Н.П.                                                                                                           |     |
| Методы изготовления оптических сенсоров на основе U-изогнутых волокон.....                                                                          | 506 |
| ЧУВЫЗГАЛОВ А.А., САДИЛОВ В.С., МАКСИМЕНКО В.А., ЛИВАШВИЛИ А.И., КРИШТОП В.В.                                                                        |     |
| Волоконно-оптический миниатюрный магнитометр на основе кольцевого резонатора.....                                                                   | 508 |
| ПАВЛОВ В.И., БРАЖНИКОВ М.К., ХАТЫРЕВ Н.П.                                                                                                           |     |
| Моделирование сенсора на основе U-образного волокна с функцией спектрального штрих-кодирования.....                                                 | 510 |
| БУШУЕВ И.Ю., БОГАЧКОВ И.В.                                                                                                                          |     |
| Анализ эффективности применения бриллюэновского оптического рефлектометра для мониторинга оптических волокон.....                                   | 512 |
| СОВЕТОВА А.Р., КРИШТОП В.В., ПЕРМИНОВ А.В.                                                                                                          |     |
| Интегрально-оптический амплитудный модулятор с цифровым управлением для опроса преобразователя оптических данных.....                               | 514 |
| ВЕКШИН М.М., КУЛИШ О.А.                                                                                                                             |     |
| Интегрально-оптические волноводы в стекле с поперечным сечением канала в форме кольца.....                                                          | 516 |
| БУШУЕВ И.Ю., БОГАЧКОВ И.В.                                                                                                                          |     |
| Бриллюэновская рефлектометрия: применение в диагностике ВОЛС.....                                                                                   | 518 |
| ШКУРСКАЯ Ю.А., ПОЛЯКОВ А.В.                                                                                                                         |     |
| Квазираспределённый волоконно-оптический датчик температуры на основе металлизированных решёток Брэгга.....                                         | 520 |

|                                                                                                                                                                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| БАДЕЕВ В.А., СЕРЕБРЯКОВ А.Д., МУРАШКИНА Т.И.<br>Двухканальное преобразование оптических сигналов в аттенуаторно-отражательных волоконно-оптических микросенсорах давления.....                                                   | 522 |
| БАТРАКОВ М.Е., ШИПИЦЫН А.В., ЛАСКАВЫЙ Н.С., КРИШТОП В.В.<br>Исследование полупроводникового оптического усилителя.....                                                                                                           | 524 |
| КУРИЛКИНА А.Н., ПОЛЯКОВ А.В.<br>Помехоустойчивость волоконно-оптических систем квантовой криптографии.....                                                                                                                       | 526 |
| ВЕКШИН М.М., ПОЛЮТОВА О.Е.<br>Моделирование широкополосного интегрально-оптического интерферометра Маха–Цендера $2 \times 2$ .....                                                                                               | 528 |
| БРАЖНИКОВ М.К.<br>Проблемы и перспективы проектирования двухдиапазонных ИК-систем для диапазона 3 – 12 мкм.....                                                                                                                  | 530 |
| ДЕНИСОВ Д.Г.<br>Метод идентификации дефектов чистоты полированных поверхностей оптических деталей на основе диагностики рассеянного лазерного излучения.....                                                                     | 532 |
| СЕМЕНОВ А.П., РУДНЕВ О.Е., КУДРЯВЦЕВ А.В.<br>Изготовление главного зеркала ИК-объектива из спечённого без давления карбида кремния.....                                                                                          | 534 |
| СОЛОПОВ Г.В., ПРОСОВСКИЙ Ю.О., ПРОСОВСКИЙ О.Ф., ИСАМОВ А.Н., СМОЛЬЯНИНОВ В.А.<br>Сравнительный анализ оптических покрытий после оперативного ремонта мишени магнетрона в лабораторных условиях.....                              | 536 |
| МАШОШИН Д.А., ДЕНИСОВ Д.Г.<br>Исследование качества оптических поверхностей деталей на основе диагностики рассеянного лазерного излучения с учётом состояния поляризации.....                                                    | 538 |
| ВИЛЬЧИНСКИЙ Д.П., МУХИН Ю.В., КУНДИКОВА Н.Д.<br>Оптико-поляризационный метод определения параметров тонких анизотропных плёнок.....                                                                                              | 540 |
| РЫКОВ И.Е., МАЙТАМА М.В., БЕЛОВ Д.А., ИКОННИКОВ Д.А., ХАБИБУЛЛИН Р.А.<br>Измерение углов расходимости излучения терагерцовых квантово-каскадных лазеров с двойным металлическим волноводом на основе метода вторых моментов..... | 542 |
| ЯКОВЛЕНКО М.М., ОБРОНОВ И.В., ЕВТИХИЕВ Н.Н.<br>Численное моделирование Yb:YAG волноводного усилителя при накачке 1007 нм.....                                                                                                    | 544 |
| СТЕПАНОВ М.А., МИТЕТЕЛО Н.В., ЛАВРОВ С.Д., ПЯТАКОВ А.П.<br>Исследование локального магнитоэлектрического взаимодействия в области магнитных доменных границ методом нелинейно-оптической микроскопии.....                        | 546 |

|                                                                                                                                                                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| СМИРНОВ В.В., ПОГОЖЕВА А.Б., АЛЫКОВА О.М.<br>Установка для изучения лазерного канала связи.....                                                                                                                                       | 548 |
| СУШКО А.С., ДЕНИСОВ Д.Г.<br>Математическое описание процесса детектирования<br>молекулярного загрязнения на поверхности кремниевой подложки<br>с нанесённым покрытием.....                                                            | 550 |
| ПАВЛОВ В.И., КУРЧАНОВ А.Ф., ХАТЫРЕВ Н.П.<br>Влияние градиента магнитного поля на параметры резонанса<br>когерентного пленения населённости в цезиевой атомной ячейке.....                                                             | 552 |
| ПОЛЕТАЕВ Д.А., СОКОЛЕНКО Б.В., БУГАСОВ И.А.<br>Концепция квантового вычислителя на тонких плёнках.....                                                                                                                                | 554 |
| ЛЮЙ П.Ц., ДЕНИСОВ Д.Г., КУДРЯШОВ А.В.<br>Исследование особенностей работы метода апертурного зондирования<br>в лабораторных условиях.....                                                                                             | 556 |
| ЛЕТОВА Е.Ю., ИВАНОВА Т.В., ЗАВГОРОДНИЙ Д.С.<br>Коррекция конечного размера точечного тест-объекта методом<br>инверсной фильтрации для вычисления функции концентрации энергии<br>при производственном контроле оптических систем..... | 558 |
| ЧЕТВЕРИН Р.С., ШАРИПОВА М.И., ФЕДЯНИН А.А.<br>Измерение показателя преломления фоторезиста в микроструктурах,<br>изготовленных методом двухфотонной лазерной литографии.....                                                          | 560 |
| БАЛАН Н.Н., ВАСИН А.А., ИВАНОВ В.В., СОКОЛОВА Е.В., ПАНКРАТОВ А.Л.<br>Оценка допусков на размеры элементов рисунка на фотошаблоне<br>для проекционной фотолитографии вблизи предела линейного разрешения.....                         | 562 |
| КАЛУГИН П.О.<br>Сравнение методов моделирования оптических систем<br>в классической теории дифракции.....                                                                                                                             | 564 |
| КОРОБКОВА А.В., МАКАРЕНКОВА Н.А.<br>Мониторинг деформаций на основе брэгговских решёток.....                                                                                                                                          | 566 |
| СОКОЛЕНКО Б.В., ЛЯХОВИЧ Н.В., ПОЛЕТАЕВ Д.А., ЕГОРОВ Ю.А.<br>Дифракционная эволюция сингулярных пучков<br>на фазовых неоднородностях отражающих поверхностей.....                                                                      | 568 |
| КУДРЯВЦЕВ А.В., ТЕЛЕШЕВСКИЙ В.И.<br>Моделирование шероховатых поверхностей<br>методом спектрального синтеза.....                                                                                                                      | 570 |
| ВАНИН А.И., ПУЧКОВ Н.И., СОЛОВЬЕВ В.Г., ЯНИКОВ М.В.<br>Обработка и анализ оптических спектров плёнок опалов.....                                                                                                                      | 572 |
| ГАВРУШКО В.В., ЗАХАРОВ М.А., КАДРИЕВ О.Р., ЛАСТКИН В.А.,<br>ПЕТРОВ А.В.<br>Особенности спектральных характеристик кремниевых фототранзисторов.....                                                                                    | 574 |
| ВОЛКОВ В.Г., ГИНДИН П.Д., КАРПОВ В.В., КУЗНЕЦОВ С.А.<br>Четырёхканальный полупроводниковый импульсный лазерный<br>осветитель.....                                                                                                     | 576 |

|                                                                                                                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ГАЛАКТИОНОВ И.В., ШАРАФИСЛАМОВ А.А., КОЛЕСНИКОВ О.В.<br>Исследование влияния аберраций линзовых систем на эффективность<br>фокусировки световых пучков.....                                              | 578 |
| ВОЛКОВ В.Г., ГИНДИН П.Д., КАРПОВ В.В., КУЗНЕЦОВ С.А.<br>Модульный осветитель-целеуказатель.....                                                                                                          | 580 |
| ПЕТРОВ Н.И.<br>Информационная энтропия частично-когерентного излучения<br>в градиентном световоде.....                                                                                                   | 582 |
| ЛАВРОВ А.П., ИВАНОВ С.И.<br>Преобразование оптического сигнала<br>в оптоволоконной структуре MMF-SMF.....                                                                                                | 584 |
| БУСУРИН В.И., ТЮНИН А.Н.<br>Компенсация температурной неустойчивости характеристик преобразователя<br>линейного ускорения на основе связанных оптических волноводов.....                                 | 586 |
| МАРКВАРТ А.А., ЗАВАЛИШИНА Л.Д., ФИЛОНОВ В.Д., БОБЫЛЕВА О.Г.,<br>ГРАЖДАН А.Л., ПЕТРОВ А.В., ЛЮКОВИЧ Л.Б., УШАКОВ Н.А.<br>Межмодовый волоконный интерферометр<br>с тэйпированным маломодовым волокном..... | 588 |
| ФЕДОРОВ Е.К., ПАВЛОВ И.Н.<br>Интерферометр на основе нарушенного полного внутреннего отражения.....                                                                                                      | 590 |
| ПОГИБА А.Ю., ВЕРЕЩАГИН В.Ю., ДОЛГОНОСОВ В.К., КОНДРАТОВ А.П.<br>Эффект Брюстера в маркировке полимерной упаковки.....                                                                                    | 592 |
| ПАВЛОВ И.Н., КОРОЛЬКОВА О.В.<br>Оптический датчик дождя и тумана на основе нарушенного полного<br>внутреннего отражения.....                                                                             | 594 |
| МАКСИМОВ Д.В., ЯКУБОВ С.И., БРЕЦЬКО М.В., ХАЛИЛОВ С.И.,<br>ЛАПАЕВА С.Н.<br>Астигматическое преобразование поляризационной структуры<br>векторных мод.....                                                | 596 |
| ЛЁВИН Д.С., ПАВЛОВ И.Н.<br>Исследование мутных жидких сред с помощью параметров<br>Стокса–Мюллера.....                                                                                                   | 598 |
| ХАЛИЛОВ С.И., БРЕЦЬКО М.В., ЯКУБОВ С.И., МАКСИМОВ Д.В.,<br>ЛАПАЕВА С.Н.<br>Прямое измерение орбитальных параметров Стокса.....                                                                           | 600 |
| ОСИЧЕВА А.Ю., СЫЧ Д.В.<br>Получение пространственного распределения параметра Стокса<br>в методе поляризационно-чувствительной вычислительной<br>однопиксельной визуализации.....                        | 602 |
| ЯКУБОВ С.И., МАКСИМОВ Д.В., ЛАПЕВА С.Н., ХАЛИЛОВ С.И.,<br>БРЕЦЬКО М.В.<br>Секторные возмущения векторных пучков<br>с поляризационными С-точками.....                                                     | 604 |

|                                                                                                                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ШАКИН О.В., КАЗАКОВ В.И., БЕСТУГИН А.Р., БЕЛЫЙ В.Н., РОПОТ П.И., КУЛАК Г.В.                                                                                                  |     |
| Оценка эффективности акустооптического пространственного сканирования квазибездифракционных пучков.....                                                                      | 606 |
| ЩЕРБАКОВА В.С., ЧИЖИКОВ А.И., ЮШКОВ К.Б., МОЛЧАНОВ В.Я.                                                                                                                      |     |
| Экспериментальное исследование акустооптических модуляторов с клиновидным пьезопреобразователем.....                                                                         | 608 |
| ШИПКО В.В., ТРОШИН О.С., ПЕТРОСЯН Я.В.                                                                                                                                       |     |
| Методика моделирования взаимных искажений разномодовых изображений, формируемых акустооптической гиперспектральной аппаратурой.....                                          | 610 |
| ТАЛАМАНОВА А.В., ЗЛОКАЗОВ Е.Ю.                                                                                                                                               |     |
| Детектирование объектов в мультимодальных данных сенсоров беспилотных авто на основе архитектуры типа трансформер.....                                                       | 612 |
| КАЛАШНИКОВА А.С., СЫЧ Д.В.                                                                                                                                                   |     |
| Анализ безопасности ВВ84 с состояниями-ловушками при наличии временного побочного канала хроматической дисперсии.....                                                        | 614 |
| СОРОКИНА А.Б., ЩЕРБИНИН Д.П.                                                                                                                                                 |     |
| Разработка программного комплекса на языке Python с использованием методов машинного зрения для обнаружения и обработки треков движения заряженных микро- и наночастиц.....  | 616 |
| ШИХОВЦЕВ А.Ю., КОВАДЛО П.Г., ЛЕЖЕНИН А.А., ДРИГА М.Б., ГРАДОВ В.С.                                                                                                           |     |
| Структура атмосферной оптической турбулентности над большим солнечным вакуумным телескопом: измерения и моделирование.....                                                   | 618 |
| ЦИПЛАКОВА Е.Г., ЧЕРНЫХ А.В., ЕЗЕРСКИЙ А.С., РАКОВ И.И., РАГИНОВ Н.И., КРАСНИКОВ Д.В., РАДИВОН А.В., БУРДАНОВА М.Г., ПЕТРОВ Н.В.                                              |     |
| Восстановление волнового фронта вихревых пучков за счёт перестройки фокусного расстояния спиральных зонных пластин в терагерцовом диапазоне.....                             | 620 |
| МАКСИМОВА Л.А., ЛЯКИН Д.В., МЫСИНА Н.Ю., РЯБУХО В.П.                                                                                                                         |     |
| Исследование свойств продольной корреляции светового волнового поля с широкими угловым и частотным спектрами на основе численного моделирования.....                         | 622 |
| КОМОЦКИЙ В.А., РАВИН А.Р.                                                                                                                                                    |     |
| Характеристики датчика угловых колебаний на основе глубокой отражательной дифракционной решётки.....                                                                         | 624 |
| АВЛАСЕВИЧ Н.Т., БЕЙТЮК Ю.Р., ЛЯЛИКОВ А.М.                                                                                                                                    |     |
| Формирование опорных полос в восстановленных интерферограммах при использовании двухэкспозиционной голограммы периодической структуры, записанной в некогерентном свете..... | 626 |

|                                                                                                                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ДОМАКОВА В.А., АРБУЗОВА К.М., РАМОС-ВЕЛАСКЕС Л., СИНЕВ Д.А.<br>Создание визуальных эффектов на основе металлических тонких покрытий<br>на поверхности стёкол, структурированных лазерными методами.....             | 628 |
| ГАНЖЕРЛИ Н.М., ГУЛЯЕВ С.Н., МАУРЕР И.А.<br>История использования слоёв бихромированного желатина в голографии....                                                                                                   | 630 |
| ИВАНЧУК Д.Р., ИВАНЧУК А.Ю., ФОМЧЕНКОВ С.А., ЦИБИКИНА А.И.<br>Экспериментальное исследование технологического процесса<br>изготовления дифракционных фильтров для реализации<br>оптической обработки информации..... | 632 |
| ГАНЖЕРЛИ Н.М., ГУЛЯЕВ С.Н., МАУРЕР И.А.<br>Голографические решётки, записанные во встречных пучках<br>на ПФГ-01 и ПФГ-03М.....                                                                                      | 634 |
| БАЛАНДИН Е.К., КОЗЛОВ А.В., ЧЕРЁМХИН П.А., ЕВТИХИЕВ Н.Н.<br>Безреференсная метрика оценки качества изображений,<br>восстановленных из голограмм.....                                                                | 636 |
| КИРИЙ С.А., РЫМОВ Д.А., СВИСТУНОВ А.С., СТАРИКОВ Р.С.,<br>ЧЕРЁМХИН П.А.<br>Исследование методов глубокого обучения для реконструкции<br>изображений с голограмм объёмных сцен.....                                  | 638 |
| СВИСТУНОВ А.С., РЫМОВ Д.А., СТАРИКОВ Р.С., ЧЕРЁМХИН П.А.,<br>ЕВТИХИЕВ Н.Н.<br>Оценка применимости синтезируемого набора данных для задач<br>нейросетевой обработки цифровых голограмм биологических клеток.....     | 640 |
| МАРКОВ З.С., ЗЛОКАЗОВ Е.Ю.<br>Нейросетевой подход к коррекции волнового фронта в компьютерной<br>голографии на основе анализа дифракционных картин.....                                                             | 642 |
| ПРОКУДИН Е.В., ШИФРИНА А.В.<br>Система нейросетевой аутентификации на основе<br>компьютерно-синтезированных киноформов.....                                                                                         | 644 |
| ОВЧИННИКОВ А.С., КРАСНОВ В.В., ЧЕРЁМХИН П.А., ШИФРИНА А.В.<br>Адаптивный метод синтеза бинарных дифракционных оптических<br>элементов.....                                                                          | 646 |
| ЛЕНКОВА Ю.С., ПЕТРОВА Е.К., ШИФРИНА А.В.<br>Методы интерполяции и бинарного растривания изображений<br>в задачах корреляционного распознавание образов.....                                                         | 648 |
| УШАКОВ Ф.А., ПАВЛЕНКО Д.В., ЗЛОКАЗОВ Е.Ю., СТАРИКОВ Р.С.<br>Реализация свёртки бинаризованных контурных изображений<br>в оптико-цифровой системе пространственной фильтрации.....                                   | 650 |
| ЗВЯГИН А.Н., ЧЕРЁМХИН П.А., КОЗЛОВ А.В., РОДИН В.Г., ЕВТИХИЕВ Н.Н.<br>Повышение качества восстановления изображений в фурье-птихографии<br>пошаговой цифровой фильтрацией.....                                      | 652 |
| Именной указатель авторов.....                                                                                                                                                                                      | 654 |

А.В. ДЫШЛЮК, А.А. ПРОСКУРИН<sup>1</sup>, А.А. БОГДАНОВ<sup>1,2</sup>,  
О.Б. ВИТРИК

*Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток*

<sup>1</sup>*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

<sup>2</sup>*Харбинский инженерный университет, Китай*

## **АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОНОВ В НАНОСТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ ТЕОРЕМЫ ВЗАИМНОСТИ**

Представленная работа посвящена аналитическому исследованию возбуждения поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) в различных наноструктурах на основе теоремы взаимности. Проведён анализ распределения электрического поля внутри неоднородностей, необходимого для применения теоремы взаимности, и выявлены поляризационные эффекты, влияющие на отклик ППП. Было получено компактное аналитическое описание ППП отклика для цилиндрических и сферических наноантенн, куполообразных структур и дифракционных решёток. Подтверждена высокая точность разработанного аналитического подхода путём сравнения с результатами полноволновых конечноэлементных симуляций. Работа открывает новые возможности для дальнейшего развития аналитических методов в плазмонике и нанофотонике.

A.V. DYSHLYUK, A.A. PROSKURIN<sup>1</sup>, A.A. BOGDANOV<sup>1,2</sup>,  
O.B. VITRIK

*Institute of Automation and Control Processes of Far Eastern Branch of the RAS,  
Vladivostok*

<sup>1</sup>*ITMO University, Saint Petersburg*

<sup>2</sup>*Harbin Engineering University, China*

## **ANALYTICAL MODELING OF SURFACE PLASMON POLARITON EXCITATION IN NANOSTRUCTURES BASED ON THE RECIPROCITY THEOREM**

This work presents an analytical investigation of the excitation of surface plasmon-polaritons (SPP) in various nanostructures using the reciprocity theorem. An analysis of the internal electric field distribution within heterogeneities required for applying the reciprocity theorem has been conducted, revealing polarization effects affecting the SPP response. Compact analytical expressions describing the SPP response for cylindrical and spherical nanoantennas, bell-shaped features, and diffraction gratings have been obtained. The accuracy of the developed analytical approach has been confirmed by comparing it with the results of full-wave finite-element simulations. The study paves



the way for further development of analytical methods in plasmonics and nanophotonics.

Поверхностные особенности материалов существенно влияют на их оптические свойства, определяя широкий спектр наблюдаемых эффектов – от случайных отклонений, таких как анизотропия отражения и рассеяния, до преднамеренно созданных улучшений, включающих усиление светопоглощения, разделение зарядов в солнечных ячейках, повышение чувствительности сенсоров и управление распределением электромагнитного поля на нано- и микромасштабах.

Такие уникальные свойства во многом обусловлены процессами возбуждения поверхностных плазмон-поляритонов (ППП), которые стали ключевым элементом современных технологий, таких как солнечные панели, сенсоры и устройства нанопотоники. Волны, соответствующие ППП, удерживаются поверхностью и могут распространяться вдоль неё на значительные расстояния, превышающие длину световой волны.

Возбуждение ППП внешним излучением требует точного согласования фаз, что накладывает особые требования на конструкцию устройств плазмоники. Обычно для этого используются специальные элементы связи, такие как призмы в схеме Кречмана или Отто, дифракционные решётки или наномантенны. Моделирование перечисленных элементов связи чаще всего осуществляется численно с использованием стандартных программных пакетов. Однако подобный подход требует значительных временных затрат и вычислительных ресурсов, кроме того, он редко позволяет раскрыть глубинную физику процессов, происходящих в устройстве. Отсюда возникает острая необходимость в развитии аналитических методов. Пока компактные аналитические выражения были получены лишь для классических схем, таких как призмы Кречмана и Отто, но не для дифракционных решёток. Специальный аналитический формализм, разработанный для моделирования наномантенн на основе диадной функции Грина, подразумевает расчёт всего рассеянного поля антенны, что неудобно и избыточно, так как для плазмонных приложений интересна лишь составляющая поля, связанная с ППП. Поэтому актуальной задачей становится создание прямого аналитического подхода для наномантенн и дифракционных решёток, который позволит устранить обозначенные недостатки. Основной целью данной работы является разработка универсального подхода к анализу возбуждения ППП различными структурами на основе теоремы взаимности, дополненного исследованием поляризационных эффектов, адаптированного к реальным сценариям, встречающимся в приборах и технических приложениях.

Среди наноантенн наибольшее внимание уделено цилиндрическим и сферическим наночастицам, а также куполообразным выступам и впадинам различного профиля на поверхности плазмонного металла. Также изучены дифракционные решётки, представляющие собой синусоидально возмущённую границу плазмонного материала. Выбор таких структур обусловлен тем, что они регулярно формируются в ходе лазерной обработки поверхности металлов и могут быть воспроизведены с помощью иных методов нанолитографии. Теорема взаимности, используемая для аналитического описания отклика ППП данных структур, требует предварительного рассмотрения распределения электрического поля внутри неоднородностей, которое зависит от поляризационных эффектов, обусловленных структурой и окружающей средой. Поэтому, решение общей задачи возбуждения ППП включает рассмотрение частного вопроса о влиянии локализованных поверхностных плазмонов. Ранее существовали аналитические описания поляризационных свойств для цилиндров и сфер, погружённых в вакуум, поэтому потребовалось адаптировать эти модели к условиям, близким к реальной поверхности. В итоге, это позволило получить компактные выражения, характеризующие отклик ППП цилиндрических и сферических наноантенн. Также удалось исследовать поляризационные эффекты, присущие куполообразным выступам и впадинам, а также синусоидально возмущённым границам. Это дало возможность получить компактные формулы для расчёта распределения поляризационных зарядов на поверхности дефектов, применимые для гладких (без острых краёв) геометрий неоднородностей, а также для плазмонного ближнего поля. В результате появилась возможность рассчитывать отклик ППП как для единичных дефектов, так и для периодических структур.

Разработанная аналитическая модель прошла проверку методом сравнения с полноволновыми численными расчётами, подтвердив свою валидность и эффективность. Хорошее качественное и количественное соответствие данным численных экспериментов свидетельствует о правильности выбранного подхода. Новый аналитический инструмент устраняет существующий разрыв, совместив прогнозирующую мощност с вычислительной простотой, что делает его полезным инструментом для решения разнообразных практических задач по исследованию оптических свойств материалов с поверхностными дефектами, проектированию направляющих волноводов, микромасштабных световодных структур, метаматериалов и гибридных оптоэлектронных компонентов.

А.Н. ЦЫПКИН, М.В. МЕЛЬНИК, А.О. НАБИЛКОВА,  
А.О. ИСМАГИЛОВ, Р.Д. МАТЮЩЕНКО, М.С. ГУСЕЛЬНИКОВ,  
И.Р. АРЦЕР, М.О. ЖУКОВА, С.А. КОЗЛОВ

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **НЕЛИНЕЙНЫЙ ОТКЛИК МАТЕРИАЛОВ В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ**

В работе экспериментально и теоретически исследуется гигантская малоинерционная нелинейность показателя преломления в терагерцовом (ТГц) диапазоне, её быстродействие и природа возникновения. Предложены новые для ТГц-диапазона экспериментальные и теоретические методы оценки нелинейности кристаллов и жидкостей со сложной структурой. Показаны особенности нелинейных взаимодействий малопериодных ТГц-импульсов.

A.N. TSYPKIN, M.V. MELNIK, A.O. NABILKOVA,  
A.O. ISMAGILOV, R.D. MATUSHENKO, M.S. GUSELNIKOV,  
I.R. ARTSER, M.O. ZHUKOVA, S.A. KOZLOV

*ITMO University, Saint Petersburg*

## **NONLINEAR RESPONSE OF MATERIALS IN THE TERAHERTZ FREQUENCY RANGE**

The work experimentally and theoretically investigates the giant, low-inertia nonlinearity of the refractive index ( $n_2$ ) in the terahertz (THz) range, its ultrafast response, and its physical origin. New experimental and theoretical methods are proposed for evaluating the nonlinearity of crystals and structurally complex liquids in the THz range. The specific features of nonlinear interactions of few-cycle THz pulses are demonstrated.

В 2019 году было показано, что коэффициент нелинейного показателя преломления воды  $n_2$  в терагерцовом (ТГц) диапазоне на шесть порядков превышает значения в видимой и ближней ИК-области, при времени отклика менее 1 пс [1]. Аналогичные эффекты обнаружены для других веществ [2, 3], что вновь открыло перспективу создания сверхбыстрых устройств управления излучением, ранее недоступную из-за недостатка материалов с одновременно большой и малоинерционной нелинейностью [4]. Недавние работы показали, что гигантская ТГц-нелинейность имеет колебательную природу и связана с ангармонизмом валентных молекулярных колебаний. В рамках этой модели  $n_2$  пропорционален коэффициенту теплового расширения, зависящему от температуры.

Измерение температурной зависимости  $n_2$  воды методом Z-scan с импульсным ТГц-излучением на основе кристалла ниобата лития [5] дало отличное совпадение с теорией, подтвердив колебательный механизм. Для органики предложена модель, в которой  $n_2$  представляется суммой вкладов отдельных типов химических связей (О–Н, С–Н, С–О и других) [6]. Для изопропанола вклад  $n_2^{(O-H)}$  оценён по данным для воды,  $n_2^{(C-H)}$  – по  $\alpha$ -пинену,  $n_2^{(C-O)}$  – по жидкому  $CO_2$ ; полученный суммарный  $n_2 \approx 4.7 \times 10^{-9} \text{ см}^2/\text{Вт}$  хорошо совпал с экспериментом [3], подтвердив применимость модели к органическим жидкостям.

Как и в оптическом и в ИК-диапазоне, в ТГц-области реализуются самофокусировка, эффект Керра, генерация гармоник и суммарно-частотное преобразование [7] и необходимо учитывать особенности малопериодных ТГц-импульсов. При распространении однопериодного ТГц-импульса в среде с кубической нелинейностью в спектре доминируют учетверённые частоты вместо утроенных [8]. Исследование показывает, что интерференция между генерацией на  $3\omega$  и фазовой самомодуляцией критически зависит от числа колебаний  $N$ : при  $N \leq 3$  синусоподобные импульсы подавляют спектр, а косинусоподобные – усиливают, позволяя управлять перераспределением энергии между гармониками [9].

Для точных измерений  $n_2$  твёрдых тел в ТГц-диапазоне впервые предложен метод Eclipse Z-scan [10]. В отличие от Z-scan, регистрируется излучение с периферии пучка при экранировании центра диском, что повышает чувствительность и позволяет измерять  $n_2 < 10^{-10} \text{ см}^2/\text{Вт}$ . Метод был опробован на  $LiNbO_3$ , для которого получено  $n_2 = 5 \times 10^{-11} \text{ см}^2/\text{Вт}$ , что сходится с более сложными экспериментами. Совокупность этих результатов проясняет природу ТГц-нелинейности и создаёт основу для проектирования сверхбыстрых оптических переключателей, логических элементов и модуляторов, использующих колебательную нелинейность.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания (паспорт № 2025-0007).

#### *Список литературы*

1. Tsyupkin A.N., et al. // Optics Express. 2019. V. 27. No. 8. P. 10419-10425.
2. Novelli F., et al. // Applied Sciences. 2020. V. 10. No. 15. P. 5290.
3. Nabilkova A., et al. // Optics Letters. 2025. V. 50. No. 15. P. 4778-4781.
4. Gibbs H. Optical bistability: controlling light with light. Elsevier, 2012.
5. Nabilkova A., et al. // Optics Letters. 2023. V. 48. No. 5. P. 1312-1314.
6. Wang C.C., et al. // Applied Optics. 2018. V. 57. No. 12. P. 3003-3011.
7. Motojima M., et al. // Optics Express. 2019. V. 27. No. 22. P. 32217-32227.
8. Artser I., et al. // Scientific Reports. 2022. V. 12. No. 1. P. 9019.
9. Artser I., et al. // Chinese Optics Letters. 2025. V. 23. No. 2. P. 021901.
10. Nabilkova A., et al. // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2024.

А.В. ПРОХОРОВ<sup>1,2</sup>, А.В. ШЕСТЕРИКОВ<sup>1,2</sup>, М.Ю. ГУБИН<sup>1,2</sup>,  
С.М. НОВИКОВ<sup>2</sup>, Р.В. КИРТАЕВ<sup>3</sup>, Е.И. ТИТОВА<sup>2</sup>,  
А.Н. ТОКСУМАКОВ<sup>3</sup>, Д.И. ЯКУБОВСКИЙ<sup>2</sup>, А.В. АРСЕНИН<sup>2,3</sup>,  
В.С. ВОЛКОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых*

<sup>2</sup>*Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), Долгопрудный*

<sup>3</sup>*Исследовательский центр новых технологий XPANCEO, Дубай, ОАЭ*

## **АНИЗОТРОПНЫЕ МЕТАПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ ТРАДИЦИОННЫХ И НОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

Использование гигантской внутренней анизотропии Ван-дер-Ваальсовых (ВдВ) материалов обеспечивает революционную платформу для управления взаимодействием света и вещества на наномасштабе. Здесь мы представляем стратегию проектирования как кремниевых, так и формируемых на основе ВдВ материалов анизотропных метаповерхностей для управления светом в дальней и ближней волновых зонах и создания на их основе новой элементной базы нанофотоники.

A.V. PROKHOROV<sup>1,2</sup>, A.V. SHESTERIKOV<sup>1,2</sup>, M.Yu. GUBIN<sup>1,2</sup>,  
S.M. NOVIKOV<sup>2</sup>, R.V. KIRTAEV<sup>3</sup>, E.I. TITOVA<sup>2</sup>,  
A.N. TOKSUMAKOV<sup>3</sup>, D.I. YAKUBOVSKY<sup>2</sup>, A.V. ARSENIN<sup>2,3</sup>,  
V.S. VOLKOV<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs*

<sup>2</sup>*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny*

<sup>3</sup>*Emerging Technologies Research Center XPANCEO, Dubai, UAE*

## **ANISOTROPIC METASURFACES BASED ON CONVENTIONAL AND NOVEL OPTICAL MATERIALS**

Harnessing the giant intrinsic anisotropy of van der Waals (vdW) materials provides a transformative platform for engineering light-matter interactions at the nanoscale. Here we propose a strategy for the design of both silicon and vdW-based anisotropic metasurfaces for far-field and near-field light manipulation and the creation of a new nanophotonics platform based on them.

В данной работе мы обсуждаем фундаментальные принципы проектирования оптических метаповерхностей для управления амплитудно-фазовыми характеристиками света в широком спектральном диапазоне. Управление ближнеполевым откликом строительных блоков

метаповерхности основано на эффектах оптической (би)- и анизотропии, вызванных, среди прочего, нарушением вращательной симметрии  $C_2$  -  $C_4$  [1] или новым типом нарушения симметрии окружающей среды. В качестве материалов для изготовления рассматриваются обычный кремний и новый класс оптических материалов – сильно анизотропные Ван-дер-Ваальсоавы материалы (ВдВ). Основой для локализации и концентрации энергии ближнего поля в них, сопровождающейся появлением высокодобротных спектральных особенностей, является возбуждение так называемых квазизапертых мод (КЗМ). Практическими результатами послужили разработанные поляризационное метазеркало (рис. 1a) и сверхтонкий концентратор энергии на основе КЗМ (рис. 1b). Впервые обнаруженный фундаментальный эффект мультипольной связи высокого порядка позволил возбуждать октупольные КЗМ (ОКЗМ) без нарушения симметрии в метаповерхностях на основе дихалькогенидов переходных металлов (рис. 1c). Создание  $\text{MoS}_2$  метаповерхности, поддерживающей ОКЗМ, стало основой для первой экспериментальной демонстрации этого замечательного эффекта [2] (рис. 1d). Моделирование связанных общим ближним полем фотолюминисцирующих двумерных материалов и диэлектрических метаповерхностей позволило разработать концепцию ВдВ-металазера и реализовать прототип на практике (рис. 1e). Управление изучаемыми эффектами связано с использованием в том числе оптомеханических эффектов при размещении метаповерхностей на гибких/тянущихся подложках (рис. 1f).

Работа выполнена при поддержке РНФ (гранты № 24-12-20015 и № 25-12-00154).

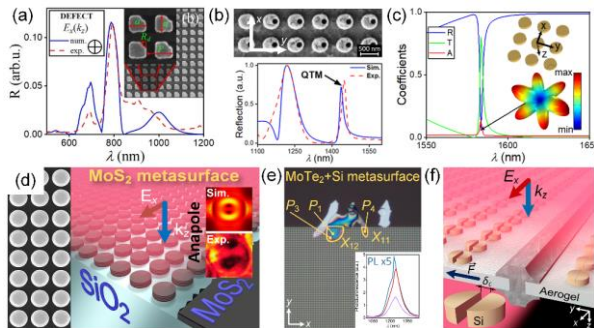


Рис. 1. Управление светом в ближнем и дальнем поле с помощью метаповерхностей

#### Список литературы

1. Evlyukhin A., et al. // Laser Photonics Rev. 2021. V. 15. P. 2100206.
2. Prokhorov A., et al. // Laser Photonics Rev. 2025. V. 19. P. 2401666.

В.Б. НОВИКОВ, К.А. СМЕРНОВ, А.А. ДОЦЕНКО,  
И.В. РОСЛЯКОВ, Е.О. СОТНИЧУК, К.С. НАПОЛЬСКИЙ,  
А.И. МАЙДЫКОВСКИЙ, Т.В. МУРЗИНА

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

## **МАЯТНИКОВЫЙ ЭФФЕКТ В ДВУМЕРНЫХ ГЕКСАГОНАЛЬНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ**

Экспериментально обнаружен оптический маятниковый эффект при Лауэ дифракции света в двумерных фотонных кристаллах, образованных массивом гексагонально-упорядоченных цилиндрических воздушных пор в анодном оксиде алюминия. Эффект проявляется выраженными спектрально-угловыми осцилляциями мощности излучения в дифракционных максимумах и обменом энергией между ними вблизи условий брэгговской дифракции.

V.B. NOVIKOV, K.A. SMIRNOV, A.A. DOTSSENKO,  
I.V. ROSLYAKOV, E.O. SOTNICHUK, K.S. NAPOLSKII,  
A.I. MAYDYKOVSKIY, T.V. MURZINA

*Lomonosov Moscow State University*

## **PENDULUM EFFECT IN TWO-DIMENSIONAL HEXAGONAL PHOTONIC CRYSTALS**

We experimentally revealed the pendulum effect for the Laue diffraction of light in two-dimensional photonic crystals consisted of a hexagonal array of cylindrical air pores in anodic alumina. The effect manifests itself as pronounced spectral-angular oscillations of the light power at diffraction maxima and the energy exchange between them near the Bragg diffraction conditions.

Создание систем, управляющих направленностью оптического излучения, представляет одну из основных целей фотоники. Особый интерес здесь вызывает маятниковый эффект, наблюдавшийся при дифракции рентгеновского излучения в кристаллах [1]. Этот фундаментальный эффект возникает при брэгговской дифракции волны в геометрии Лауэ и заключается в периодическом обмене энергией между волнами различных порядков дифракции при их распространении в кристалле. По сравнению с рентгеновским диапазоном, в оптике фотонные кристаллы (ФК) обладают значительно более высоким контрастом показателя преломления, позволяя эффективно перенаправлять излучение с использованием этого эффекта. К настоящему

моменту оптический маятниковый эффект наблюдался в 1D ФК и голографических решётках, оставаясь неисследованным в 2D ФК [2, 3].

В работе исследуется маятниковый эффект при Лауэ-дифракции света в гексагональном ФК толщиной 30 мкм, образованном массивом цилиндрических пор с диаметром 180 нм и периодом 400 нм в анодном оксиде алюминия (рис. 1а). Структура была получена электрохимическим анодированием плёнки алюминия с предварительно созданным на её поверхности гексагональным массивом затравок, нанесённых сфокусированным ионным пучком. Такой подход обеспечил высокую упорядоченность пор полученного 2D ФК.

Методом частотно-угловой спектроскопии экспериментально обнаружены выраженные осцилляции коэффициента пропускания ФК вблизи брэгговского угла падения излучения, соответствующего  $k_x/G = 0.5$  на рис. 1б. Измеренные спектры дифракционных эффективностей в максимумах выпшедшего излучения демонстрируют обмен энергией между дифрагированными пучками света нулевого и первого порядков при варьировании длины волны и угла падения излучения, что подтверждает обнаружение маятникового эффекта в исследованном 2D ФК. Показано, что эффект наиболее выражен вблизи М точки зоны Бриллюэна, установлена его сильная поляризационная зависимость. Обнаруженный эффект и его особенности подтверждены численным моделированием и показана ключевая роль двух- и трёхмодовой интерференции света в возникновении маятникового эффекта на краю зоны Бриллюэна.

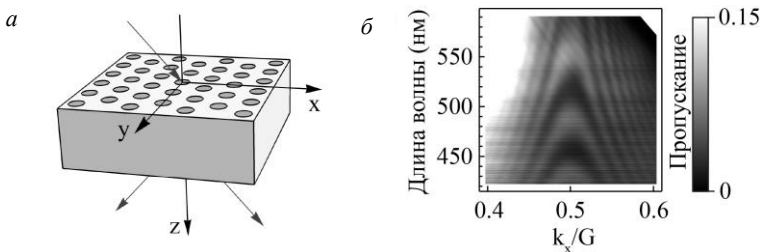


Рис. 1. Схема дифракции излучения в 2D ФК (а), спектрально-угловая зависимость коэффициента пропускания в нулевом порядке дифракции для s-поляризованного падающего излучения,  $k_x$  – тангенциальная компонента волнового вектора,  $G$  – длина вектора обратной решётки гексагонального ФК (б)

#### Список литературы

1. Kato N., Lang A. // Acta Cryst. 1959. V. 12. P. 787.
2. Novikov V.B., Svyakhovskiy S.E., et al. // J. Appl. Phys. 2015. V. 118. P. 193101.
3. Calvo M.L., Cheben P., et. al. // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 97 (8). P 084801.



С.В. МУТИЛИН, А.Г. МИЛЁХИН, Ю.С. МАКАРОВ,  
 В.А. СЕЛЕЗНЕВ, В.С. ТУМАШЕВ, Е.К. БАГОЧЮС,  
 Н.Д. МАНЦУРОВ, С.Н. РЕЧКУНОВ, А.Е. ГАЙДУК,  
 А.И. КОМОНОВ, И.А. АЗАРОВ, И.И. КРЕМИС, А.В. ТУРБИН,  
 Р.А. ГЛАДКОВ, В.В. ВАСИЛЬЕВ, А.А. МОИСЕЕВ,  
 В.С. СУТОРМИН<sup>1</sup>, М.Н. КРАХАЛЕВ<sup>1</sup>, А.В. БАРАННИК<sup>1</sup>,  
 К.А. ФЕЙЗЕР<sup>1</sup>, А.С. АБДУЛЛАЕВ<sup>1</sup>, Д.А. КОСТИКОВ<sup>1</sup>,  
 М.А. ЛЕСНОЙ<sup>1</sup>, О.О. ПРИЩЕПА<sup>1</sup>, В.Я. ЗЫРЯНОВ<sup>1</sup>,  
 С.Д. РУДАКОВ<sup>2</sup>, С.И. СУРОДИН<sup>2</sup>, Т.А. ШОБОЛОВА<sup>2</sup>,  
 Е.Л. ШОБОЛОВ<sup>2</sup>, Д.М. ЛИННИК<sup>3</sup>, В.А. ЮРИН<sup>3</sup>,  
 Р.М. ШАГАЛИЕВ<sup>3</sup>, А.В. ЛАТЫШЕВ

*Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск*

<sup>1</sup>*Институт физики им. Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск*

<sup>2</sup>*Научно-исследовательский институт измерительных систем им.*

*Ю.Е. Седакова, филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ, Нижний Новгород*

<sup>3</sup>*РФЯЦ – Всероссийский научно-исследовательский институт  
экспериментальной физики, Саров, Нижегородская обл.*

## **СОЗДАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ФАЗОВОГО МОДУЛЯТОРА СВЕТА НА ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ С ВЫСОКИМ РАЗРЕШЕНИЕМ**

Приведены результаты разработки высокоразрешающего пространственного фазового модулятора ( $1024 \times 1024$  пикселя) на жидких кристаллах (ЖК) для видимого диапазона. Устройство, созданное на основе технологии «жидкий кристалл на кремнии», обеспечивает фазовую модуляцию более  $2\pi$  за счёт управления ориентацией молекул ЖК электрическим полем. Продемонстрирована возможность формирования сложных фазовых профилей.

S.V. MUTILIN, A.G. MILEKHIN, Yu.S. MAKAROV,  
 V.A. SELEZNEV, V.S. TUMASHEV, E.K. BAGOCHUS,  
 N.D. MANTSUROV, S.N. RECHKUNOV, A.E. GAYDUK,  
 A.I. KOMONOV, I.A. AZAROV, I.I. KREMIS, A.V. TURBIN,  
 R.A. GLADKOV, V.V. VASILIEV, A.A. MOISEEV, V.S. SUTORMIN<sup>1</sup>,  
 M.N. KRAKHALEV<sup>1</sup>, A.V. BARANNIK<sup>1</sup>, K.A. FEISER<sup>1</sup>,  
 A.S. ABDULLAYEV<sup>1</sup>, D.A. KOSTIKOV<sup>1</sup>, M.A. LESNOY<sup>1</sup>,  
 O.O. PRISHCHEPA<sup>1</sup>, V.Ya. ZYRYANOV<sup>1</sup>, S.D. RUDAKOV<sup>2</sup>,  
 S.I. SURODIN<sup>2</sup>, T.A. SHOBOLOVA<sup>2</sup>, E.L. SHOBOLOV<sup>2</sup>,  
 D.M. LINNIK<sup>3</sup>, V.A. YURIN<sup>3</sup>, R.M. SHAGALIEV<sup>3</sup>, A.V. LATYSHEV

*Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of SB RAS, Novosibirsk*

*<sup>1</sup>Kirensky Institute of Physics of FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk*

*<sup>2</sup>Yu.E. Sedakov Research Institute – branch of All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Nizhny Novgorod*

*<sup>3</sup>All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Nizhny Novgorod region*

## **DEVELOPMENT OF A HIGH-RESOLUTION LIQUID CRYSTAL SPATIAL PHASE LIGHT MODULATOR**

This work presents a high-resolution ( $1024 \times 1024$ ) liquid-crystal spatial phase modulator for the visible spectrum. Based on the liquid-crystal-on-silicon (LCoS) technology, the device achieves a phase shift exceeding  $2\pi$  by electrically controlling the molecular orientation. We demonstrate its capability to generate complex phase profiles through individual pixel addressing.

Пространственные фазовые модуляторы света (ПФМС) служат для управления волновым фронтом и находят применение в системах преобразования, хранения и обработки информации. Наиболее развитой на сегодняшний день технологией для фазовой модуляции лазерного излучения являются модуляторы на основе электрооптической ячейки типа «жидкий кристалл на кремнии» (LCoS). Такие ячейки работают на основе S-эффекта в нематическом жидком кристалле (ЖК), конструктивно представляя собой сэндвич-структуру из верхнего прозрачного электрода (стекла с проводящим слоем ITO), слоя ЖК и кремниевой подложки с массивом индивидуально адресуемых отражающих пикселей [1]. Принцип действия основан на управлении ориентацией ЖК-молекул электрическим полем – задавая распределение напряжений по матрице пикселей, можно формировать требуемый фазовый профиль в режиме реального времени.

В работе рассмотрены принципы работы и технологии создания ПФМС на ЖК. Приведены результаты разработки в ИФП СО РАН высокоразрешающего ПФМС с мегапиксельным разрешением ( $1024 \times 1024$ ), который для видимого диапазона обеспечивает фазовую модуляцию более  $2\pi$ . Экспериментально подтверждена возможность формирования сложных фазовых профилей за счёт индивидуального управления пикселями.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 1 «Национальный центр исследования архитектур суперкомпьютеров. Этап 2023-2025».

### *Список литературы*

1. Lazarev G., Chen P.-J., et.al. // Optics Express. 2019. V. 27. No. 11. P. 16206.

Т.В. РЕЗЦОВ, А.В. ЧЕРНЫХ, И.Г. СТЕПАНОВ, Т.Н. ОРЛОВА<sup>1</sup>,  
Н.В. ПЕТРОВ

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

*<sup>1</sup>Ереванский государственный университет, Армения*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ОТКЛИКА ДВУХЧАСТОТНОГО НЕМАТИЧЕСКОГО ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА ДЛЯ ГОМОГЕНИЗАЦИИ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА**

Представлено исследование динамического отклика двухчастотного нематического жидкого кристалла (ЖК) с отрицательной диэлектрической анизотропией на переменное электрическое поле. Целью работы является определение стабильных режимов работы ячейки для создания эффективного ЖК-гомогенизатора лазерного излучения. Экспериментально определены оптимальные параметры напряжения и частоты, обеспечивающие устойчивое динамическое рассеяние для подавления когерентного шума в задачах цифровой голографии.

T.V. REZTSOV, A.V. CHERNYKH, I.G. STEPANOV, T.N. ORLOVA<sup>1</sup>,  
N.V. PETROV

*ITMO University, Saint Petersburg*

*<sup>1</sup>Yerevan State University, Armenia*

## **STUDY OF DYNAMIC BEHAVIOR OF A DUAL-FREQUENCY NEMATIC LIQUID CRYSTAL FOR LASER BEAM HOMOGENIZATION**

The study investigates the dynamic response of a dual-frequency nematic liquid crystal (LC) with negative dielectric anisotropy to an alternating electric field. The aim is to determine stable operational regimes of the cell for creating an effective LC homogenizer of laser radiation. The optimal voltage and frequency parameters providing stable dynamic scattering for speckle noise suppression were determined experimentally.

Когерентный шум, обусловленный дифракцией узкополосного лазерного излучения на оптических элементах, существенно ограничивает качество регистрации и реконструкции изображений в лазерных оптико-цифровых системах, включая голографические и корреляционные методы [1]. Для его подавления в цифровой голографии активно развиваются как оптико-цифровые методы, использующие множественные регистрации с варьируемым спекловым полем [2, 3], так и алгоритмы постобработки, например, адаптивная 3D-фильтрация [4]. Однако эти подходы либо

требуют сложных изменений оптической схемы, либо значительных вычислительных ресурсов. Перспективной альтернативой являются компактные и управляемые жидкокристаллические диффузоры, создающие динамическое рассеяние и эффективно снижающие когерентность без использования механических элементов [5]. При этом ключевой задачей остается исследование и оптимизация режимов их работы, обеспечивающих устойчивые характеристики рассеяния во времени. В связи с этим целью данной работы является исследование динамического отклика двухчастотного нематического жидкого кристалла (ЖК) с отрицательной диэлектрической анизотропией под действием переменного электрического поля и определение условий формирования стабильного ЖК-гомогенизатора.

В данной работе исследовался динамический отклик двухчастотного нематического ЖК-материала с отрицательной диэлектрической анизотропией ( $\Delta\epsilon < 0$ ) на переменное электрическое поле. Целью работы была оптимизация параметров поля для создания стабильного ЖК-гомогенизатора.

Была собрана экспериментальная установка, включающая лазерный модуль, поляризатор (призма Глана), фокусирующую линзу, держатель ЖК-ячейки толщиной 10 мкм, поляризационный светоделитель и измеритель мощности. На ячейку подавалось переменное напряжение синусоидальной и прямоугольной формы в диапазонах частот 2 - 20 кГц и напряжений 5 - 20 В.

В ходе экспериментов измерялась интенсивность ортогональных линейно-поляризованных компонент прошедшего через ЖК-ячейку излучения. Для образцов были определены режимы электрического поля, обеспечивающие наиболее устойчивый динамический отклик (рассеяние).

#### *Список литературы*

1. Davletshin N.N., et al. // Optics Letters. 2022. V. 47 (1). P. 9-13.
2. Dong J., Jia S., Yu H. // Optics. Image Sci. Vision. 2019. V. 36 (7). P. 740-747.
3. Jin Y., Hansford D.J., Elston S.J., Morris S.M. // Adv. Photonics Res. 2021. V. 2 (6). P. 2000184.
4. Kerov A.A., Kozlov A.V., Cheremkhin P.A., Shifrina A.V., Starikov R.S., Zlokazov E.Yu., Petrova E.K., Nebavsky V.A., Evtikhiev N.N. // Sensors. 2025. V. 25 (17). P. 6251.
5. Hsu C.J., et al. // Optics Lett. 2025. V. 50 (12). P. 3812-3815.

Г.М. ШИШКОВ, К.С. ГРИГОРЬЕВ, В.А. МАКАРОВ  
*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

**ГЕНЕРАЦИЯ ВЕКТОРНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННО-  
ВРЕМЕННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ  
ПРИ САМОВОЗДЕЙСТВИИ СВЕТОВОГО ИМПУЛЬСА  
В ИЗОТРОПНОЙ ФАЗЕ НЕМАТИЧЕСКОГО ЖИДКОГО  
КРИСТАЛЛА ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ БЛИЗКОЙ  
К ТЕМПЕРАТУРЕ ПЕРЕХОДА В МЕЗОФАЗУ**

Показано, что при распространении эллиптически поляризованного светового импульса в изотропной фазе нематического жидкого кристалла около температуры перехода в мезофазу в структуре его светового поля зарождаются векторные пространственно-временные оптические вихри (ПВОВ) с противоположными знаками топологических зарядов. Получено, что пространственная нелокальность нелинейного оптического отклика среды, время релаксации кубической нелинейности вещества, интенсивность и поляризация падающего импульса, а также тепловые эффекты, – оказывают существенное влияние как на характер распространения светового импульса, так и на закономерности в рождении и эволюции ПВОВ. Приведена статистика основных параметров, характеризующих распространение импульса и рождение векторных ПВОВ, полученная на основе численного моделирования распространения импульса в более чем в  $10^5$  задач.

G.M. SHISHKOV, K.S. GRIGORIEV, V.A. MAKAROV  
*Lomonosov Moscow State University*

**GENERATION OF VECTORIAL SPATIOTEMPORAL OPTICAL  
VORTICES DURING SELF-ACTION OF A LIGHT PULSE  
IN THE ISOTROPIC PHASE OF A NEMATIC LIQUID  
CRYSTAL CLOSE TO NEMATIC-ISOTROPIC TRANSITION  
TEMPERATURE**

It is shown that during the propagation of an elliptically polarized light pulse in the isotropic phase of a nematic liquid crystal near the phase transition temperature, vector spatiotemporal optical vortices (STOVs) with opposite signs of topological charge emerge in the structure of its optical field. It is established that the pronounced spatial nonlocality of the medium's nonlinear optical response, the relaxation time of the material's cubic nonlinearity, the intensity and polarization of the incident pulse, as well as thermal effects, have a significant impact both on the nature of light propagation and on the regularities governing the generation and evolution of STOVs. Statistics of the

main parameters characterizing pulse propagation and the formation of vector STOVs are presented, obtained from simulations of pulse propagation in more than  $10^5$  cases.

Нематические жидкие кристаллы (НЖК), находящиеся в изотропной фазе при температурах, близких к температурам фазового перехода, обладают выраженной временной инерционностью и сильной пространственной нелокальностью нелинейно-оптического отклика [1]. Оба этих фактора стабилизируют нелинейный коллапс импульса и делают его распространение более сложным за счёт конкуренции между процессом самофокусировки в нелинейной среде и дефокусировки, связанной с инерционностью и нелокальностью отклика среды [2].

Целью настоящей работы является исследование влияния параметров, характеризующих степень пространственной нелокальности и инерционности, а также теплопроводности и коэффициента поглощения среды, вместе с параметрами, характеризующими мощность и поляризацию падающего импульса на векторные пространственно-временные оптические вихри (ПВОВ). Они представляют собой геометрическое место точек в неоднородно поляризованном свете, в которых амплитуда одной из двух ортогонально поляризованных компонент его электрического поля обращается в нуль [3]. В отличие от случая монохроматических световых пучков, такие кольца не покоятся, а движутся вместе с импульсом, примерно с его групповой скоростью. ПВОВ обладают топологическим зарядом, характеризующимся аналогично классическим оптическим вихрям [4]. Нагрев среды, сопровождающий самофокусировку импульса, усложняет картину распространения. Так, передний и задний фронты импульса испытывают различное влияние среды не только из-за различной степени упорядоченности молекул НЖК (за счёт переориентации в световом поле) на переднем и заднем фронтах [5], но и из-за неоднородного нагрева среды вдоль оси распространения импульса. На практике данный эффект проявлялся, в первую очередь, в появлении существенной продольной асимметрии импульса, которая, в отдельных случаях приводила к отделению субимпульса на его заднем фронте. При этом, вблизи локальных максимумов интенсивности в продольном сечении импульса, как правило, обнаруживались ПВОВ.

#### *Список литературы*

1. De Gennes P.G. // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 1971. V. 12 (3). P. 193-214.
2. Arakelyan S.M., et al. // *Radiophysics and Quantum Electronics*. 1979. V. 22 (1). P. 36-41.
3. Bekshaev A. // *APL Photonics*. 2024. V. 9 (11) P. 110806.
4. Dennis M.R., O'Holleran K., Padgett M.J. // *Progress in Optics*. 2009. V. 53. P. 293-363.
5. Shishkov G.M., Grigoriev K.S., Makarov V.A. // *Laser Phys. Lett.* 2025. V. 22 (11). P. 115401.

П.В. ДОЛГАНОВ, Е.А. МАКСИМОВ, Н.В. БАЛЕНКО<sup>1</sup>,  
В.К. ДОЛГАНОВ

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

*<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

## **ТРЁХМЕРНЫЕ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ С УПРАВЛЯЕМЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

Приготовлены хиральные жидкокристаллические фотонные кристаллы с фотоуправляемыми спектральными характеристиками, изучены их оптические свойства. Обнаружен индуцированный освещением переход из изотропной фазы в кубическую фотонную структуру.

P.V. DOLGANOV, E.A. MAKSIMOV, N.V. BALENKO<sup>1</sup>,  
V.K. DOLGANOV

*Osipyan Institute of Solid State Physics of the RAS, Chernogolovka*

*<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University*

## **THREE-DIMENSIONAL LIQUID-CRYSTALLINE PHOTONIC CRYSTALS WITH CONTROLLABLE CHARACTERISTICS**

Chiral liquid-crystalline photonic crystals with light-controlled characteristics were obtained, their optical properties were studied. Light-induced transition from the isotropic phase to cubic photonic structure was discovered.

Хиральные жидкокристаллические фотонные кристаллы благодаря уникальным оптическим свойствам и восприимчивости к внешним воздействиям являются перспективными объектами для создания фотонных устройств с перестраиваемыми характеристиками (зеркала, светофильтры, лазеры и другие). Значительное число работ в этом направлении посвящено использованию фоточувствительных хиральных материалов, изменяющих свои характеристики, в частности, период упорядочения, под действием освещения [1, 2]. Наиболее интересные жидкокристаллические фотонные кристаллы – кристаллические жидкости (голубые фазы) с кубической структурой, основой которой является двойная закрутка ориентации молекул (рис. 1).

Нами приготовлены жидкокристаллические фотонные кристаллы с фотоуправляемыми характеристиками. Для реализации этой задачи были использованы смеси на основе нехирального жидкого кристалла 7OCB, хирального вещества CB15 и фотохромного хирального допанта

MeAzoSorb [3]. Высококачественные образцы с фотонными зонами в видимом диапазоне получены в плоских оптических ячейках. Проведены измерения спектров пропускания и отражения. Фотоиндуцированная трансформация структуры осуществлялась путём освещения лазерными диодами с длинами волн 365 455 нм.

Освещение светом ультрафиолетового (УФ) диапазона приводит к увеличению периода структуры и к смещению полос селективного отражения в длинноволновую область. Помимо непрерывного смещения положения рефлексов, наблюдались переходы между различными фазами со скачкообразным изменением оптических свойств. При освещении видимым светом происходит обратная трансформация. Обнаружено образование кубической структуры при освещении изотропной фазы УФ-светом (рис. 2). Индуцированная кубическая структура обладает конечной областью стабильности относительно времени освещения [4]. Наблюдаемое поведение связывается с нетривиальной геометрией фазовой диаграммы температура – освещение.

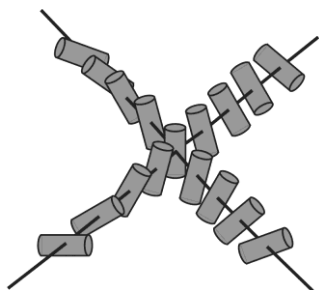


Рис. 1. Схематическое изображение двойной закрутки ориентации молекул в голубых фазах жидких кристаллов

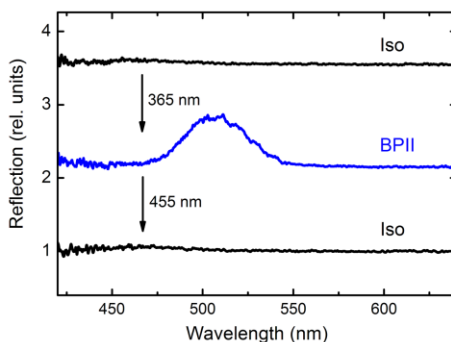


Рис. 2. Изменение спектров отражения при фотоиндуцированных переходах из изотропной фазы в кубическую и обратно при освещении УФ и видимым светом

Исследование выполнено в рамках Государственного задания ИФТТ РАН.

#### Список литературы

1. Ma L., Hu W., et al. // Adv. Optical Mater. 2019. P. 1900393.
2. Oton E., Cigl M., et al. // Scientific Reports. 2024. V. 14. P. 9910.
3. Bobrovsky A., Ryabchun A., et al. // J. Mater. Chem. 2014. V. 2. P. 8622.
4. Долганов П.В., Максимов Е.А., Баленко Н.В. // Письма в ЖЭТФ 2025. Т. 122. С. 299.



А.П. ОЛЕЙНИКОВА, И.Г. ДАДЕНКОВ, А.Л. ТОЛСТИК  
*Белорусский государственный университет, Минск*

## **ДИФРАКЦИОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ В ФОТОРЕФРАКТИВНЫХ КРИСТАЛЛАХ**

Приведены результаты экспериментального исследования по формированию астигматической линзы Френеля в фоторефрактивном кристалле силиката висмута. Проанализированы характеристики дифракционного оптического элемента.

H.P. ALEINIKAVA, I.G. DADENKOV, A.L. TOLSTIK  
*Belarusian State University, Minsk*

## **DIFFRACTIONAL OPTICAL ELEMENTS IN PHOTOREFRACTIVE CRYSTALS**

The results of an experimental study on the formation of an astigmatic Fresnel lens in a photorefractive bismuth silicate crystal are presented. The characteristics of the diffractive optical element are analyzed.

Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) являются облегченной альтернативой традиционных оптических элементов, позволяющие управлять светом посредством дифракции. ДОЭ могут использоваться в качестве дисперсионных элементов, элементов для мультиплексирования световых пучков, средства коррекции aberrаций и др. [1 - 3]. Эти элементы могут быть созданы при помощи микроструктурирования или средствами голографии.

Голографические оптические элементы (ГОЭ) являются разновидностью дифракционных оптических элементов. Они могут формировать изображение или волновой фронт заданной произвольной формы, выполнять функции рассеивателя или фокусатора. Голографическая линза Френеля относится к ГОЭ [2, 4].

Отдельный интерес вызывает свойства ГОЭ, сформированных в фоторефрактивных кристаллах семейства силленитов, к которым относится силикат висмута  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ , поскольку эти кристаллы обладают возможностью записи динамических голограмм высокого разрешения.

Для записи голографической линзы Френеля была использована схема, представленная на рис. 1. Излучение второй гармоники импульсного Nd:YAG лазера 1, пройдя через светоделительный кубик 2, разделялось на

два одинаковых пучка. Затем эти пучки при помощи зеркал 3 и 4 собирались вместе на кристалле силиката висмута 6, причём угол между ними составлял  $90^\circ$ . На пути распространения одного из пучков устанавливалась собирающая линза 5 таким образом, что расстояние до кристалла оказывалось меньше фокусного расстояния. Таким образом в кристалле формировалась объёмная голограмма интерференции плоской и сферической волн. Восстановление голограммы происходило излучением He-Ne лазера 7, падающего на кристалл под углом Брэгга. Восстановленное изображение фиксировалось на ПЗС-камере 9. Результаты эксперимента представлены на рис. 2.

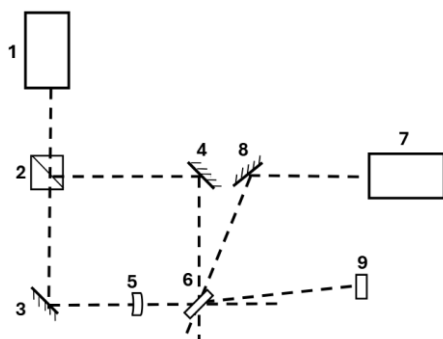


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – Nd:YAG лазер, 2 – светоделительный кубик, 3, 4, 8 зеркала, 5 – собирающая линза, 6 – фоторефрактивный кристалл BSO, 7 – He-Ne лазер, 9 – камера

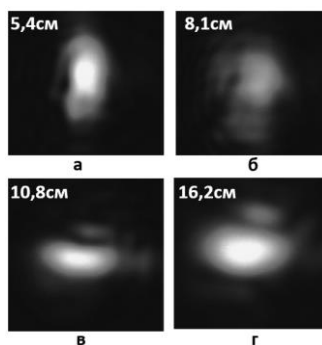


Рис. 2. Фотографии восстановленной линзы-голограммы в фокусах (а, в), между фокусами (б) и после фокусов (г) при положении фокусирующей линзы от кристалла силиката на расстоянии 0,2f

Особенностью схемы является формирование линзы Френеля со структурой в виде концентрических эллипсов вместо колец. Данная эллиптическая структура приводит к возникновению астигматизма в восстановленном изображении, проявляющегося в наличии двух фокусов, расстояние между которыми не зависит от положения линзы.

#### Список литературы

1. Ditto T.D., et al. // Proc. SPIE, 2020. V. 11443. P. 11443B.
2. Сойфер В.А., и др. // Компьютерная оптика. 2009. Т. 33. № 4. С. 352-368.
3. Сойфер В.А. // Соросовский образовательный журнал. 1999. Т. 5. № 4. С. 110-115.
4. Муслимов Э.Р. и др. // Фотоника. 2020. Т. 14. № 7. С. 586-599.

А.А. БУРЦЕВ<sup>1</sup>, В.В. ИОНИН<sup>1</sup>, А.В. КИСЕЛЕВ<sup>1</sup>,  
В.А. МИХАЛЕВСКИЙ<sup>1</sup>, А.А. НЕВЗОРОВ<sup>1,2</sup>, А.А. ЛОТИН<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Институт проблем лазерных и информационных технологий*

*НИИЦ «Курчатовский институт». Шатура*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,  
Москва*

<sup>3</sup>*Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва*

## **ЯЧЕЙКИ АДАПТИВНОГО ФАЗОСДВИГАЮЩЕГО ФИЛЬТРА С ОПТИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ТОНКИХ ПЛЁНОК ФАЗОИЗМЕНЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ**

В работе представлены результаты моделирования и данные экспериментов исследований фазового сдвига проходящего оптического пучка, обусловленного формированием слоистой структуры в элементарной управляемой ячейке из фазоизменяемого материала  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , подвергнутой управляющему воздействию импульсного лазерного излучения короткой и ультракороткой длительности. Для воздействующего импульсного излучения построены расчётные графики толщины кристаллического слоя в материале плёнки для учёта модуляции излучения.

A.A. BURTSEV<sup>1</sup>, V.V. IONIN<sup>1</sup>, A.V. KISELEV<sup>1</sup>,  
V.A. MIKHALEVSKY<sup>1</sup>, A.A. NEVZOROV<sup>1,2</sup>, A.A. LOTIN<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Institute on Laser and Information Technologies of NRC «Kurchatov Institute», Shatura*

<sup>2</sup>*National University of Science and Technology MISIS, Moscow*

<sup>3</sup>*Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow*

## **ADAPTIVE PHASE-SHIFTING FILTER CELLS WITH OPTICAL CONTROL BASED ON PHASE-CHANGE MATERIALS THIN FILMS**

The article presents the results of modeling and experimental data of phase-shift studies of a passing optical beam, caused by the formation of a layered structure in an elementary unit cell of phase-change material  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , controlled by pulsed laser radiation of short and ultra-short duration. For the impact of pulsed radiation, calculation graphs of the thickness of the crystalline layer in the film material are built to account for radiation modulation.

Фазоизменяемые материалы (ФИМ) – идеальные кандидаты для полностью оптических устройств хранения и обработки информации. Яркой функциональной особенностью этих материалов является высокий контраст между кристаллической и аморфной фазами как по их

электрическим, так и по оптическим свойствам [1, 2]. В долгосрочной перспективе открываются и демонстрируются возможности их эффективного применения для динамической модуляции света. Используя различие оптических свойств разных фаз, исследователи разработали настраиваемые модуляторы света на основе материала  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  (GST), оптические ограничители и поляризационные отражатели [3, 4]. Структуры на основе ФИМ продемонстрировали настраиваемое сингулярное поведение фазы световой волны в точке темноты при переходе слоя GST из аморфной в кристаллическую фазу [5]. Данный эффект лежит в основе таких явлений, как эффект Ааронова–Бома и фаза Бери. Соответственно, необходимо комплексное исследование управление фазой отраженного и проходящего света при переключении ячейки ФИМ.

На основе данных серии экспериментов и математического моделирования были проанализированы особенности модуляции проходящего излучения при кристаллизации тонких плёнок сплава GST. Показано, что можно подобрать оптимальную толщину и параметры воздействия лазерного излучения (энергию и длительность импульсов, диаметр пучка) [6, 7].

Перспективность предложенного метода управления оптическим фронтом заключается в использовании элементарной ячейки, которая функционирует как быстроедействующий фазовый вращатель для пучков любой апертуры. Уникальность технологии – в способности изменять оптические свойства, сохраняя структурную целостность материала, что позволяет проводить гибкую и мгновенную настройку. Устройство обладает широкой полосой спектральной модуляции и быстро перестраивается под управляющим воздействием лазерного излучения.

#### *Список литературы*

1. Wuttig M., Yamada N. // *Nature materials*. 2007. V. 6. No. 11. P. 824-832.
2. Sarwat S.G. // *Materials science and technology*. 2017. V. 33. No. 16. P. 1890-1906.
3. Wuttig M., et al. // *Nature photonics*. 2017. V. 11. No. 8. P. 465-476.
4. Guo P., Sarangan A.M., Agha I. // *Applied sciences*. 2019. V. 9. No. 3. P. 530.
5. Sreekanth K.V., Han S., Singh R. // *Adv. Mater.* 2018. V. 30. P. 1706696.
6. Kiselev A.V., et al. // *JETP Letters*. 2024. V. 120. No. 6. P. 440-444.
7. Kiselev A.V., et al. // *Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials*. 2024. No. 16. P. 651-657.

А.О. ЗЛОБИН, А.А. ШМИДТ, Д.С. КОЛЕСНИКОВ,  
Н.И. БУРИМОВ, С.М. ШАНДАРОВ

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники*

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЦИРКУЛЯРНОЙ ОПОРНОЙ ВОЛНЫ  
С ЭЛЛИПТИЧЕСКИ-ПОЛЯРИЗОВАННОЙ СИГНАЛЬНОЙ  
ВОЛНОЙ НА ПРОПУСКАЮЩЕЙ ГОЛОГРАММЕ  
В КРИСТАЛЛЕ СИЛИКАТА ВИСМУТА**

Приведены результаты теоретического и экспериментального исследования взаимодействия сильной стационарной циркулярно-поляризованной волны накачки со слабой фазово-модулированной сигнальной волной, сохраняющей эллиптическую поляризацию, на динамической пропускающей голограмме в образце силиката висмута среза [110].

A.O. ZLOBIN, A.A. SHMIDT, D.S. KOLESNIKOV, N.I. BURIMOV,  
S.M. SHANDAROV

*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*

**INTERACTION OF CIRCULAR PUMP WAVE  
WITH ELLIPTICALLY POLARIZED SIGNAL WAVE  
ON TRANSMITTING HOLOGRAM  
IN BISMUTH SILICATE CRYSTAL**

We present the result of theoretical and experimental research of two-wave interaction of strong stationary circularly polarized pump wave with weak phase-modulated signal wave, which has elliptical polarization. The interaction carries on in bismuth silicate crystal [110]-cut on dynamic transmitting hologram.

Кубический гиротропный кристалл силиката висмута ( $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ , BSO) обладает рядом свойств, делающих его привлекательным для динамической голографии. К числу этих свойств относятся величина и скорость фоторефрактивного отклика этого материала. BSO характеризуется сильной оптической активностью, вследствие чего собственные волны для данного кристалла имеют циркулярную поляризацию. Взаимодействие циркулярно-поляризованных волн на пропускающих динамических голограммах в образцах BSO изучалось в работах [1, 2], где использовались волны, сохраняющие циркулярную поляризацию одного знака.

В настоящем сообщении показано, что если опорная волна имеет сохраняющуюся левую или правую циркулярную поляризацию, а сигнальная представляет собой суперпозицию двух волн разного знака, то есть имеет эллиптическую поляризацию, то в сигнале демодуляции обнаруживается дополнительная компонента, причём её знак зависит от разности фаз между лево- и правополяризованной компонентами в сигнальной волне. Полученные экспериментальные результаты (точки) и соответствующие теоретические зависимости (линии) для эффективного параметра демодуляции на частоте первой гармоники  $M_{1m}$  от параметра  $R_C$ , характеризующего отношение компонент в разложении эллиптически поляризованной сигнальной волны, представлены на рис. 1. Из него следует, что чем ближе  $R_C$  к единице, тем более вытянут эллипс поляризации для сигнальной волны. Следует также отметить различия в эффективности демодуляции при использовании опорной волны с различными знаками циркулярной поляризации и рост дополнительного вклада в фоторефрактивный отклик с увеличением степени эллиптичности сигнальной волны.

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

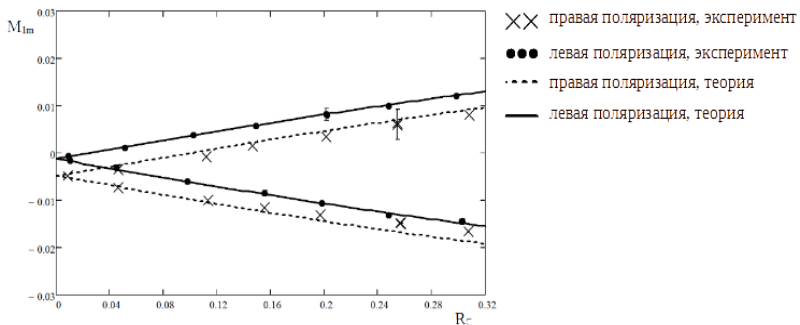


Рис. 1. Зависимость эффективного параметра демодуляции на частоте первой гармоники от параметра эллиптичности сигнальной волны

#### Список литературы

1. Абдулина А.С. и др. // XX Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике: сборник трудов конференции. Самара, 2022. С. 72.
2. Шандаров С.М. и др. // Невская фотоника-2023: сборник трудов. Санкт-Петербург, 2023. С. 64.

В.А. ЖУРАВЛЕВ<sup>1,2</sup>, А.А. КОЗЛОВ<sup>1,2</sup>, А. А. НОРОВА<sup>1</sup>,  
И.В.ПЕТУХОВ<sup>2</sup>, В.А. ДЕМИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Пермская научно-производственная приборостроительная компания

<sup>2</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет

## **ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ В ТОНКОПЛЕНОЧНОМ НИОБАТЕ ЛИТИЯ ПОСЛЕ МОДИФИКАЦИИ ПРОТОННЫМ ОБМЕНОМ**

Приведены результаты исследования анизотропии показателя преломления тонкопленочного ниобата лития методом призмного ввода излучения после протонного обмена. Показано, что изменение показателей преломления тонкопленочного ниобата лития X-среза после протонного обмена схоже по величине с изменениями в объемном ниобате лития.

V.A. ZHURAVLEV<sup>1,2</sup>, A.A. KOZLOV<sup>1,2</sup>, A.A. NOROVA<sup>2</sup>,  
I.V.PETUHOV<sup>2</sup>, V.A. DEMIN<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company

<sup>2</sup>Perm National Research State University

## **FEATURES OF REFRACTIVE INDEX CHANGE IN THIN FILM LITHIUM NIOBATE AFTER PROTON EXCHANGE MODIFICATION**

The results of experimental study of a thin film lithium niobate refractive index anisotropy after proton exchange by the method of prism coupling are presented. It is shown that the change in the refractive indices of the X-cut thin film lithium niobate after proton exchange is similar in magnitude to the changes in bulk lithium niobate.

Тонкопленочный ниобат лития (ТНЛ) является одним из перспективных материалов для создания фотонных интегральных схем (ФИС) с высокой плотностью интеграции. Один из ключевых процессов при создании таких ФИС является процесс реактивного ионного травления (РИТ), который может также включать предварительный протонный обмен (ПО) для повышения селективности [1].

Целью работы является экспериментальное исследование изменения ПП ( $\Delta n_o$  – изменение обыкновенного ПП,  $\Delta n_e$  – изменение необыкновенного ПП) тонкопленочного НЛ X-среза после модификации протонным обменом. Варьировалось время протонного обмена. Средний

по глубине ПП измерялся при помощи установки призмного ввода излучения Metricon 2010/М [2]. Толщина ПО-слоя определялась методом профилирования скорости РИТ по толщине плёнки: определялась глубина травления, на которой скорость РИТ не отличается от скорости РИТ исходного ТНЛ. Зная средний по глубине ПП, толщину ПО-слоя и предполагая, что распределение ПП по глубине в ТНЛ после ПО имеет вид (рис. 1), можно оценить изменения ПП (по отношению к исходному ТНЛ) фаз  $H_xLi_{1-x}NbO_3$ , формируемых во время ПО (рис. 2).  $\Delta n_o$  в ТНЛ и в НЛ сходны по величине.  $\Delta n_e$  в ТНЛ несколько меньше  $\Delta n_e$  в объёмном НЛ, что может быть связано с особенностями метода расчёта. Вероятно, предположение о ступенчатом распределении ПП по глубине не является достаточно точным, и необходимо учитывать реальное распределение ПП в ПО ТНЛ, которое невозможно получить обратным ВКБ-методом [4] при малой толщине  $H_xLi_{1-x}NbO_3$ .

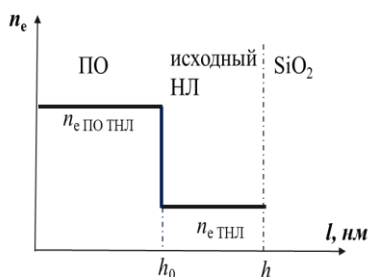


Рис. 1. Предполагаемое распределение показателя преломления в ТНЛ после ПО

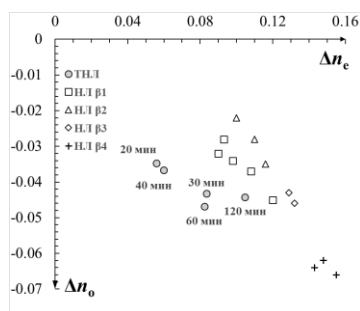


Рис. 2. Результат измерения  $\Delta n_o$  и  $\Delta n_e$  ПО ТНЛ, значения  $\Delta n_o$  и  $\Delta n_e$  для объёмного НЛ взяты из работы [3]

#### Список литературы

1. Журавлев В.А., Салгаева У.О., Петухов И.В. и др. // Труды 10-й Всероссийской Диагностической конференции по волоконной оптике. Пермь, 2025. С. 146-149.
2. Журавлев В.А., Козлов А.А., Демин В.А. и др. // XIV Международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2025. С. 49-50.
3. Korkishko Yu.N., Fedorov V.A. Structural phase diagram of  $H_xLi_{1-x}NbO_3$  waveguides: The correlation between optical and structural properties // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 1996. V. 2. No. 2. P. 187-196.
4. Dikaev Yu.M., Kopylov Yu.A., Kotelyanskii I.M. Simple method to determine the index profiles in graded waveguides // Sov J Quantum Electron. 1981. V. 11. No. 2. P. 225-226.



М.В. САРАФАНОВА, А.И. ШУГУРОВ, М.И. БАКУНОВ  
*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского*

## **ПОПУТНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ МНОГОПЕРИОДНОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ФЕМТОСЕКУНДНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ В КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ**

Приведены результаты теоретического анализа генерации узкополосного терагерцового излучения при оптической ректификации фемтосекундного лазерного импульса в кристалле ниобата лития в условиях нелинейного смешивания обыкновенной и необыкновенной оптических волн. Для кристалла толщиной 2,2 мм и двух длительностей импульса накачки (340 и 680 фс) найдены значения угла между пучком накачки и оптической осью кристалла, обеспечивающие максимальную эффективность генерации в попутном к накачке направлении. Рассчитаны осциллограммы и спектры излучения.

M.V. SARAFANOVA, A.I. SHUGUROV, M.I. BAKUNOV  
*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod*

## **FORWARD GENERATION OF MULTICYCLE TERAHERTZ RADIATION BY FEMTOSECOND LASER PULSE IN LITHIUM NIOBATE CRYSTAL**

Narrowband terahertz generation via nonlinear optical mixing of ordinary and extraordinary components of a femtosecond laser pulse in a lithium niobate crystal is considered theoretically. For a 2.2-mm thick crystal and two pump pulse durations (340 and 680 fs), the values of the angle between the pump beam and the crystal optical axis, which maximize the generation efficiency in the forward direction, are found. The radiation oscillograms and spectra are calculated.

Оптическая ректификация ультракоротких лазерных импульсов в нелинейных кристаллах широко используется для генерации (квази)однопериодных импульсов терагерцового излучения. В то же время для целого ряда приложений, таких, например, как терагерцовое ускорение частиц [1] и манипуляция возбуждениями в веществе [2], требуется многопериодное (узкополосное) терагерцовое излучение. В работе [3] был предложен метод генерации такого излучения, основанный на нелинейном смешивании обыкновенной и необыкновенной составляющих импульса накачки в анизотропном кристалле ниобата лития. Генерация многопериодного излучения в обратном по отношению к направлению движения импульса накачки направлении была

экспериментально продемонстрирована в работе [4]. В данной работе проведён теоретический анализ генерации в попутном направлении.

Расчёты проводились для кристалла толщиной 2,2 мм, двух длительностей импульса накачки (340 и 680 фс) и пиковой интенсивности накачки  $100 \text{ ГВт/см}^2$ . На рис. 1 представлены зависимости эффективности оптико-терагерцовой конверсии от угла  $\theta$  между пучком накачки и оптической осью кристалла. С увеличением длительности импульса накачки максимум эффективности смещается в сторону больших углов: от  $68,25^\circ$  при 340 фс до  $72,5^\circ$  при 680 фс. При этом само максимальное значение уменьшается. Центральная частота генерируемого спектра равна  $0,77 \text{ ТГц}$  при  $\theta = 68,25^\circ$  и  $0,51 \text{ ТГц}$  при  $\theta = 72,5^\circ$ . Соответствующие значения ширины спектра равны 27 и 23 ГГц.

Осциллограмма, соответствующая максимальной эффективности конверсии ( $\theta = 68,25^\circ$ , длительность импульса 340 фс), представлена на рис. 2. Лидирующая (высокочастотная) часть осциллограммы соответствует излучению в прямом направлении, запаздывающая (низкочастотная) – отражённому от входной границы кристалла излучению назад.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования (FSWR-2024-0003).

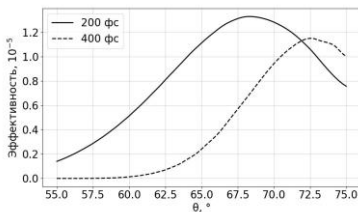


Рис. 1. Зависимость эффективности конверсии от угла  $\theta$

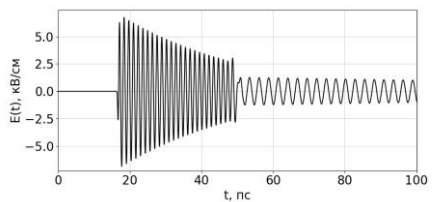


Рис. 2. Осциллограмма при  $\theta = 68,25^\circ$  и длительности импульса 340 фс

#### Список литературы

1. Hibberd M.T., Healy A.L., Lake D.S., et al. // Nat. Photonics. 2020. V. 14. P. 755272.
2. Kampfrath T., Tanaka K., Nelson K.A. // Nat. Photonics. 2013. V. 7, P. 680.
3. Mashkovich E.A., Sychugin S.A., Bakunov M.I. // J. Opt. Soc. Am. B. 2017. V. 34. P. 1805.
4. Bodrov S.B., Shugurov A.I., Bakunov M.I. // Opt. Lett. 2025. V. 50. P. 5763.

А.Д. МОЛЧАНОВА, С.А. КЛИМИН, Н.Н. КУЗЬМИН,  
Л.Х. ИНЬ<sup>1</sup>, М.Н. ПОПОВА

*Институт спектроскопии РАН, Троицк*

*<sup>1</sup>Институт физики твердого тела Китайской академии наук, Хэфэй, Китай*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО УПОРЯДОЧЕНИЯ МУЛЬТИФЕРРОИКА $h$ -YbMnO<sub>3</sub> МЕТОДОМ СПЕКТРОСКОПИИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ**

Проведено исследование расщепления крамеровских дублетов иона Yb<sup>3+</sup> в кристалле  $h$ -YbMnO<sub>3</sub> при T<sub>N</sub> = 85 К. Получена температурная зависимость расщепления  $\Delta_0(T)$  основного крамеровского дублета иона иттербия в позиции 4b. Она использована для расчёта температурного поведения магнитного момента иона Yb<sup>3+</sup>(4b). Оценено значение эффективного магнитного поля, действующего на ионы Yb<sup>3+</sup>(4b). Сделан вывод о том, что магнитный момент иттербия в позиции 4b является результатом подмагничивания в эффективном поле, создаваемом упорядоченной магнитной подсистемой марганца.

A.D. MOLCHANOVA, S.A. KLIMIN, N.N. KUZMIN,  
L.H. YIN<sup>1</sup>, M.N. POPOVA

*Institute of Spectroscopy of the RAS, Troitsk*

*<sup>1</sup>Institute of Solid State Physics of Chinese Academy of Sciences, Hefei, China*

## **INVESTIGATION OF MAGNETIC ORDERING OF MULTIFERROIC $h$ -YbMnO<sub>3</sub> BY HIGH-RESOLUTION SPECTROSCOPY**

The splittings of Kramers doublets of the Yb<sup>3+</sup> ion in  $h$ -YbMnO<sub>3</sub> crystal is studied. The temperature dependence of the splitting  $\Delta_0(T)$  of the ground Kramers doublet of the ytterbium ion in the 4b position is obtained. It is used to calculate the temperature behavior of the magnetic moment of the Yb<sup>3+</sup>(4b) ion. The value of the effective magnetic field acting on the Yb<sup>3+</sup>(4b) ions is estimated. It is concluded that the magnetic moment of ytterbium in the 4b position is a result of magnetization in the effective field created by the manganese subsystem.

Гексагональные манганиты редкоземельных элементов REEMnO<sub>3</sub> характеризуются сильной связью сегнетоэлектрических, магнитных и диэлектрических свойств [1 - 4]. Гексагональная модификация YbMnO<sub>3</sub> (далее –  $h$ -YbMnO<sub>3</sub>) кристаллизуется в пространственной группе  $R\bar{6}_3cm$ . Ионы Yb<sup>3+</sup> в этой структуре занимают две кристаллографические

позиции:  $2a$  и  $4b$ .  $h$ -YbMnO<sub>3</sub> обладает сложной фазовой диаграммой, в которой реализуются магнитные фазовые переходы. При  $T_N = 85$  К наблюдается магнитный фазовый переход подсистемы марганца в 120-градусную структуру в плоскости  $ab$  [3]. Крамерсовские дублеты ионов Yb<sup>3+</sup> чувствительны к эффективному магнитному полю, создаваемому упорядоченной подрешёткой Mn. Подсистема Yb<sup>3+</sup>( $4b$ ) при  $T_N$  упорядочивается антиферромагнитно, при этом подсистема Yb<sup>3+</sup>( $2a$ ) не упорядочивается вплоть до температуры 4 К. Ниже 4 К вся магнитная подсистема Yb<sup>3+</sup> переходит в слабую антиферромагнитную фазу.

Ранее в спектроскопической работе [5] сообщалось о расщеплении линий в спектрах пропускания  $h$ -YbMnO<sub>3</sub>, связанном со снятием крамерсовского вырождения уровней иона Yb<sup>3+</sup> обменным взаимодействием. Кроме того, в терагерцовом диапазоне спектров пропускания была зарегистрирована линия 11.5 см<sup>-1</sup>, интерпретированная авторами как компонента расщеплённого состояния основного крамерсовского дублета [6].

В настоящей работе были зарегистрированы спектры пропускания кристалла  $h$ -YbMnO<sub>3</sub> в широком диапазоне температур. В спектрах хорошо различимы линии электронных переходов как ионов Yb, так и Mn. При магнитном фазовом переходе при  $T_N = 85$  К наблюдается расщепление линий Yb<sup>3+</sup>( $4b$ ), связанное с расщеплением соответствующих крамерсовских дублетов. Анализ спектров позволил получить температурную зависимость расщепления основного состояния Yb<sup>3+</sup>( $4b$ ). При температуре 4 К величина расщепления составляет 11.5 см<sup>-1</sup>, что согласуется с предположением авторов [6]. Проведено моделирование температурного поведения магнитного момента  $M_{Yb(4b)}$  и аномалии Шоттки в теплоёмкости.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ для ИСАН № FFUU-2025-0004.

#### *Список литературы*

1. Lorenz B., et al. // Phys Sci. Rev. 2019. V. 4 (12). P. 20190014.
2. Shan Z., et al. // J Mater Sci: Mater Electron. 2025. V. 36. P. 26.
3. Chattopadhyay S., et al. // Phys. Rev. B. 2018. V. 98. P. 134413.
4. Sharma N., et al. // Adv. Mater. Interfaces. 2025. V. 12. P. 2400813.
5. Divis M., et al. // J. Alloys Comp. 2008. V. 451. P. 662.
6. Standard E.C., et al. // Phys. Rev. B. 2012. V. 85. P. 144422.

Д.П. КУЛИКОВА<sup>1</sup>, А.В. ШЕЛАЕВ<sup>1</sup>, Е.С. ЛОТКОВ<sup>1,2</sup>,  
А.С. БАБУРИН<sup>1,2</sup>, И.А. РОДИОНОВ<sup>1,2</sup>, А.В. БАРЫШЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики  
им. Н.Л. Духова, Москва

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

## ГАЗОХРОМНЫЕ СВОЙСТВА АМОРФНОГО И КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ТРИОКСИДА ВОЛЬФРАМА

С помощью метода спектральной эллипсометрии установлено, что при восстановлении в водороде максимум изменения мнимой части диэлектрической проницаемости аморфного триоксида вольфрама наблюдается на  $E = 1,1$  эВ, а кристаллизованного при  $400^\circ\text{C}$  до моноклинной фазы  $m\text{-WO}_3$  смещается в меньшие энергии, при этом величина изменения возрастает в  $\approx 5$  раз. На основе результатов спектроскопии комбинационного рассеяния обнаружено, что при взаимодействии с водородом в триоксиде вольфрама изменяется длина связей W-O и происходит формирование вольфрамовой кислоты ( $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ).

D.P. KULIKOVA<sup>1</sup>, A.V. SHELAEV<sup>1</sup>, E.S. LOTKOV<sup>1,2</sup>,  
A.S. BABURIN<sup>1,2</sup>, I.A. RODIONOV<sup>1,2</sup>, A.V. BARYSHEV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA), Moscow

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University

## GASOCHROMIC PROPERTIES OF AMORHOUS AND CRYSTALLIZED TUNGSTEN TRIOXIDE

In-situ spectroscopic ellipsometry measurements revealed that upon reduction in a hydrogen gas, the maximum change in the imaginary part of the dielectric permittivity of amorphous tungsten trioxide occurs at a photon energy of  $E = 1.1$  eV. In contrast, for samples crystallized at  $400^\circ\text{C}$  into the monoclinic phase, this maximum shifts to lower energies, and the magnitude of the change increases by a factor of  $\approx 5$ . Using Raman spectroscopy, it was established that hydrogen interaction with tungsten trioxide leads to alterations in the W-O bond lengths and the formation of tungstite ( $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ).

Разработка оптических сенсоров  $\text{H}_2$  на основе газохромных оксидов является востребованным направлением исследований. Использование триоксида вольфрама  $\text{WO}_3$  в паре с катализатором (Pd, Pt) в качестве чувствительного материала перспективно ввиду его выраженных газохромных свойств. Несмотря на многочисленные исследования  $\text{WO}_3$ , вопрос улучшения его газочувствительности (амплитуда и скорость отклика, исключение деградации) остаётся актуальным [1].

Образцы были изготовлены (НОЦ «ФМН» МГТУ им. Н.Э. Баумана, ID 74300) с помощью электронно-лучевого испарения и представляли собой аморфные плёнки  $\text{WO}_3$  толщиной 180 нм, покрытые слоем катализатора Pd с весовой толщиной 1 нм, на кремниевых подложках. Один из образцов был отожжён в воздухе при температуре 400 °C в течение двух часов, что привело к кристаллизации  $\text{WO}_3$  до моноклинной фазы  $m\text{-WO}_3$ , уменьшению толщины плёнки до 145 нм и увеличению действительной части диэлектрической проницаемости  $\varepsilon = \varepsilon_1 - i\varepsilon_2$  (рис. 1а).

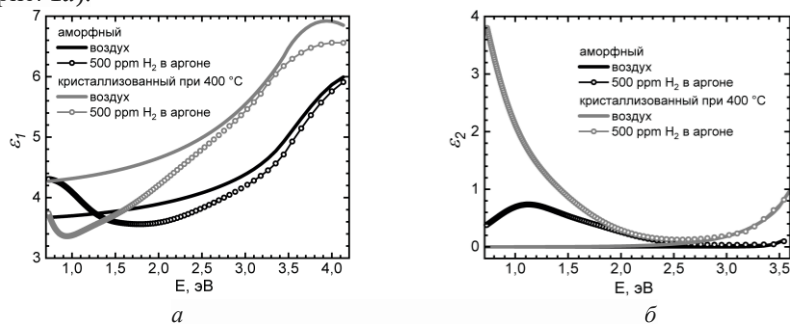


Рис. 1. Действительная (а) и мнимая (б) части диэлектрической проницаемости аморфного и кристаллизованного при 400 °C  $\text{WO}_3$  при восстановлении в водороде

С помощью аппроксимации спектров эллипсометрических параметров плёнок была определена диэлектрическая проницаемость  $\text{WO}_{3-x}$  в управляемой атмосфере и обнаружено, что при восстановлении в  $\text{H}_2$  в ближней инфракрасной области спектра формируется полоса поглощения с максимумом  $\varepsilon_2 = 0,74$  на 1,1 эВ (рис. 1б), обусловленная образованием кислородных вакансий на поверхности и в объёме оксида [2]. Для кристаллизованного  $m\text{-WO}_{3-x}$  максимальная величина  $\varepsilon_2 = 3,8$  соответствовала меньшим энергиям. Наблюдаемые особенности объясняются изменением электронной структуры  $m\text{-WO}_3$  и распределением поверхностных и объёмных кислородных вакансий. С использованием спектроскопии комбинационного рассеяния было установлено, что исключительно в процессе реакции восстановления формируется вольфрамовая кислота  $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  [3], которая, как известно, разлагается при повышенных температурах.

#### Список литературы

1. Kulikova D.P., et al. // Scientific Reports. 2023. V. 13. P. 890.
2. Kulikova D.P., et al. // International Journal of Hydrogen Energy. 2024. V. 82. P. 767-775.
3. Daniel M.F., et al. // Journal of Solid State Chemistry. 1987. V. 67. P. 235-247.

Р.Д. ХАРИСОВА, А.Д. РАТОВА, К.С. ЗЫРЯНОВА, Л.Ю. МИРОНОВ  
*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

**МЕХАНОИНДУЦИРОВАННЫЙ СИНТЕЗ  
НАНОКРИСТАЛЛОВ ПЕРОВСКИТОВ  $\text{CsPbBr}_3$   
НА ПОВЕРХНОСТИ БОРОГЕРМАНАТНОГО СТЕКЛА**

Исследовано формирование нанокристаллов  $\text{CsPbBr}_3$  на поверхности борогерманатного стекла при механическом воздействии. Приведены зависимости люминесцентных свойств нанокристаллов перовскитов от времени перемалывания в планетарной мельнице. Показано, что при таком способе синтеза максимальный квантовый выход составляет 60 %, кристаллизация продолжается даже после 40 мин перемалывания.

R.D. KHARISOVA, A.D. RATOVA, K.S. ZYRYANOVA,  
L.Yu. MIRONOV  
*ITMO University, Saint Petersburg*

**MECHANICALLY-INDUCED FORMATION OF  $\text{CsPbBr}_3$   
PEROVSKITE NANOCRYSTALS ON THE SURFACE  
OF BOROGERMANATE GLASS**

The study investigates mechanically-induced formation of  $\text{CsPbBr}_3$  perovskite nanocrystals on the surface of borogermanate glass. The dependence of luminescent properties of perovskite nanocrystals on the grinding time in a planetary mill was shown. The maximum quantum yield achieved with this synthesis method was 60 %, the amount of crystalline phase continued growing even after 40 min of grinding.

Кристаллы металл-галогенидных перовскитов зарекомендовали себя как перспективный материал для люминесцентных и оптоэлектронных применений благодаря высоким квантовым выходам люминесценции и её перестраиваемому в видимой области спектру [1]. Неорганические стеклообразные матрицы являются одним из наиболее долговечных материалов для выделения перовскитов, так как обладают высокими механической, химической и термической устойчивостями. На данный момент было показано, что, помимо традиционного способа выделения нанокристаллов перовскитов в объёме стекла при отжиге стекла или во время дополнительной термообработки, возможно сформировать нанокристаллы металл-галогенидных перовскитов на поверхности стекла, содержащего прекурсоры перовскитов, при механическом воздействии,

то есть при раскалывании или перетирании в ступке [2]. Такой способ кристаллизации до сих пор не был известен для неорганических оксидных стёкол, однако существуют работы, показывающие кристаллизацию металлических стёкол при перемалывании [3]. В данной работе исследовалось выделение при механическом воздействии нанокристаллов перовскитов  $\text{CsPbBr}_3$  на поверхности борогерманатного стекла.

Для исследования синтезировано стекло системы  $\text{B}_2\text{O}_3 - \text{GeO}_2 - \text{Na}_2\text{O} - \text{ZnO} - \text{K}_2\text{O} - \text{Cs}_2\text{O} - \text{PbO} - \text{Br}^-$ . Для воспроизводимости результатов стекло было перемолото в планетарной шаровой мельнице в течение различного времени. После размалывания на поверхности стекла формируются кристаллы перовскитов с полосой люминесценции на  $\sim 517$  нм. Их расположение на поверхности подтверждается тем, что их люминесценция и поглощение пропадают при промывании порошка стекла в полярных растворителях, таких как изопропиловый спирт, глицерин и вода. Эксперимент показал, что при увеличении времени перемалывания квантовый выход люминесценции сначала растёт, затем после 10 мин перетирания остаётся почти неизменным, порядка 60 % (рис. 1а). Однако при этом кристаллическая фаза продолжает расти на поверхности стекла и после 40 мин перемалывания, что подтверждается измерениями поглощения порошка стекла и сигнала интегральной люминесценции (рис. 1б). Также в работе исследовалось влияние концентрации прекурсоров и кристаллизаторов на формирование кристаллов перовскитов на поверхности стекла при механическом воздействии.

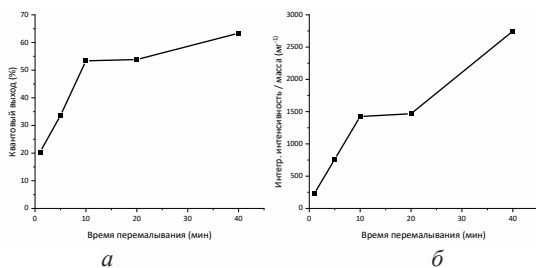


Рис. 1. Зависимость квантового выхода (а) и интегральной интенсивности (б) люминесценции нанокристаллов  $\text{CsPbBr}_3$  на поверхности стекла от времени перемалывания

#### Список литературы

1. Shamsi J., et al. // Chemical reviews. 2019. V. 119 (5). P. 3296.
2. Samiei S., et al. // Small. 2024. V. 20 (17). P. 2307972.
3. Wu J., et al. // J. Alloys Compd. 2010. V. 504. P. S264.



А.В. СЮЙ, И.А. ЗАВИДОВСКИЙ, И.В. МАРТЫНОВ, Б.Е. ПОЗОВ  
*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный*

## **ДЕФЕКТНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ ПРОТИВ АМОРФИЗАЦИИ: РАЗЛИЧНЫЕ ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ В ЛАЗЕРНО-СИНТЕЗИРОВАННЫХ НИОБИЕВЫХ ОКСИДАХ**

Проведено сравнительное исследование фемтосекундной лазерной абляции в жидкости для порошков  $\text{LiNbO}_3$  и  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ . Быстрая лазерная фрагментация приводит к принципиально различным структурным сценариям:  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  превращается в аморфные наночастицы, тогда как  $\text{LiNbO}_3$  формирует дефектные поликристаллические наночастицы. Именно кинетика кристаллизации определяет отличие механизмов – доминирование дефектной инженерии или аморфизации – в фотокалитической активности. Аморфный  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  характеризуется быстрым рекомбинированием зарядов и низким выходом активных радикалов, а дефектный  $\text{LiNbO}_3$  обладает поглощением в видимом диапазоне, увеличенным временем жизни носителей и вдвое лучшей скоростью разрушения метиленового синего (до 90 % за 150 мин). Показано, что контроль кристалличности при лазерном синтезе имеет решающее значение для повышения эффективности фотокатализа.

A.V. SYUY, I.A. ZAVIDOVSKY, I.V. MARTYNOV, B.E. POZOV  
*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny*

## **DEFECT ENGINEERING VERSUS AMORPHIZATION: DIFFERENT PHOTOCATALYTIC MECHANISMS IN LASER-SYNTHESIZED NIOBIUM OXIDES**

A comparative study of femtosecond laser ablation in liquids was conducted for  $\text{LiNbO}_3$  and  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  powders. Rapid laser fragmentation leads to fundamentally different structural scenarios:  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  transforms into amorphous nanoparticles, while  $\text{LiNbO}_3$  forms defective polycrystalline nanoparticles. It is the crystallization kinetics that determines the difference in mechanisms—the dominance of defect engineering or amorphization—in photocatalytic activity. Amorphous  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  is characterized by rapid charge recombination and a low yield of active radicals, while defective  $\text{LiNbO}_3$  exhibits absorption in the visible range, an increased carrier lifetime, and a threefold higher rate of methylene blue destruction (up to 90 % in 150 min). It is shown that control of crystallinity during laser synthesis is crucial for improving the efficiency of photocatalysis.

Управление атомным порядком и состояниями дефектов в широкозонных оксидах металлов имеет решающее значение для

разработки оптических и каталитических материалов. Традиционные методы синтеза не позволяют селективно корректировать такие дефекты без лигандов. Фемтосекундная лазерная абляция в жидкости (LAL) позволяет синтезировать безлигандные наночастицы (НЧ) и структуры с опосредованными дефектами в экологически чистых условиях, но баланс между кристалличностью и аморфизацией остаётся сложной задачей. В данной работе мы сравниваем  $\text{LiNbO}_3$  и  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  в качестве моделей для структурной эволюции и фотокаталитической эффективности при сверхбыстрой лазерной фрагментации в воде, исследуя, как внутренние свойства материалов определяют расходящиеся пути и результаты каталитического взаимодействия.

Лазерная абляция формировала сферические наночастицы ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ : 44 нм,  $\text{LiNbO}_3$ : 69 нм). Raman/FTIR подтвердили полную аморфизацию  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ , тогда как  $\text{LiNbO}_3$  сохранял поликристаллическую решётку с выраженными дефектными проявлениями. Лазерно-индуцированная аморфизация увеличила поглощение  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  в видимом диапазоне, но с широкими урбаховскими хвостами и быстрой рекомбинацией носителей заряда. Богатый дефектами  $\text{LiNbO}_3$  продемонстрировал дискретные состояния в середине запрещённой зоны, люминесценцию со смещением в синюю область и усиленное поглощение в видимом диапазоне, что способствовало увеличению времени жизни носителей заряда. НЧ  $\text{LiNbO}_3$  продемонстрировали константу скорости  $k = 0,0067 \text{ мин}^{-1}$ , что в 2,3 раза выше, чем у  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  ( $k = 0,0029 \text{ мин}^{-1}$ ), и в 3,5 раза выше фоновой скорости. 90 % удаление красителя было достигнуто через 150 мин при концентрации катализатора всего 0,2 г/л. Исследования методом ЭПР выявили эффективное образование гидроксильных и супероксидных радикалов для  $\text{LiNbO}_3$ , в то время как аморфный  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  не генерировал значительного количества активных форм кислорода (ROS).

Различная фотокаталитическая эффективность обусловлена различной структурной эволюцией при LAL. Склонность  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  к стеклообразованию приводит к аморфизации и появлению большого количества центров безызлучательной рекомбинации, что препятствует разделению зарядов и деградации красителя. Термодинамическая стабильность  $\text{LiNbO}_3$  способствует быстрой кристаллизации, образованию дефектов и созданию благоприятных состояний в середине запрещённой зоны, которые способствуют образованию ROS под действием видимого света, что подтверждает, что инженерия дефектов является оптимальной стратегией.

А.М. МЕЛЬНИКОВА, А.В. ЦОРИЕВА<sup>1</sup>, В.М. КОРШУНОВ<sup>1</sup>,  
Т.Н. ЧМОВЖ<sup>2</sup>, И.В. ТАЙДАКОВ<sup>1</sup>

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

<sup>1</sup>*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

<sup>2</sup>*Институт органической химии им. Н.Д. Зелинского РАН, Москва*

## **УПРАВЛЕНИЕ ФОТОФИЗИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ДОНОРНО-АКЦЕПТОРНЫХ МОЛЕКУЛ НА ОСНОВЕ ТРИЦИКЛИЧЕСКОГО АКЦЕПТОРА**

Исследованы спектры поглощения, люминесценции, кинетики, квантовые выходы, константы излучательных и безызлучательных процессов для исследованных молекул. Анализ результатов позволил установить тип молекул с наибольшей эффективностью люминесценции.

A.M. MELNIKOVA, A.V. TSORIEVA<sup>1</sup>, V.M. KORSHUNOV<sup>1</sup>,  
T.N. CHMOVZH<sup>2</sup>, I.V. TAYDAKOV<sup>1</sup>

*Bauman Moscow State Technical University*

<sup>1</sup>*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

<sup>2</sup>*Zelinsky Institute of Organic Chemistry of the RAS, Moscow*

## **CONTROL OF PHOTOPHYSICAL PROPERTIES OF DONOR-ACCEPTOR MOLECULES BASED ON A TRICYCLIC ACCEPTOR**

We studied the absorption and emission spectra, kinetics, quantum yields, and rate constants for radiative and nonradiative processes of the investigated molecules. Our analysis identified the type of molecules exhibiting the highest luminescence efficiency.

Органические донорно-акцепторные молекулы, активно применяются в качестве светоизлучающего слоя в органических светоизлучающих диодах (OLED), в качестве активных сред лазеров на красителях и в биомедицинских исследованиях [1]. Для всех этих задач, необходимо уметь направленно настраивать фотофизические свойства молекул с помощью вариаций в их молекулярной структуре. Несмотря на то, что описаны несколько подходов дизайна химических структур таких люминофоров, применение их для новых классов веществ возможно в ограниченных случаях из-за сложной электронной структуры. Поэтому для новых классов соединений необходимо проводить комплекс исследований для установления закономерностей «химическая

структура – свойства». В данной работе исследованы фотофизические свойства новых донорно-акцепторных молекул. Было проведено сравнение красителей симметричных с одинаковыми донорными фрагментами и несимметричных, в которых один из донорных фрагментов отличался. Было установлено как в зависимости от химической структуры, можно получить высокие показатели эффективности люминесценции (квантовый выход).

В спектрах поглощения исследованных молекул наблюдаются, две полосы, обусловленные двумя излучающими состояниями локально-возбуждённым (300 - 400 нм) и внутримолекулярным переносом заряда (400 - 500 нм). В спектрах люминесценции симметричных молекул наблюдаются полоса излучения, сдвинутая в диапазоне (1 - 114 нм) в коротковолновую область по сравнению с полосой излучения несимметричных молекул (рис. 1).

Для того, чтобы выяснить какая природа состояния доминирует в излучающих процессах, были измерены кинетики и рассчитаны константы излучательных и безызлучательных процессов. В итоге установлено, что у симметричных молекул квантовые составляли (> 50 %), в то время как у несимметричных квантовых выходов находились в диапазоне (1 - 40 %).

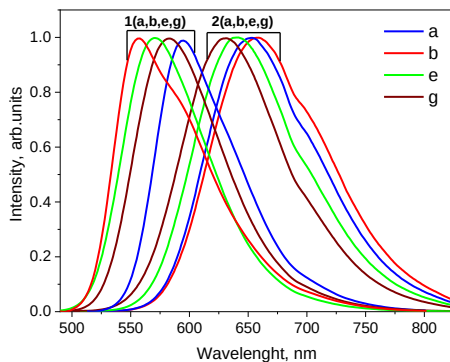


Рис. 1. Спектры излучения симметричных (1) и несимметричных молекул (2) с различными донорами а, b, e, g, полученные в  $\text{CHCl}_3$

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-73-00175)

#### Список литературы

1. Misra R., Bhattacharyya S.P. Intramolecular charge transfer: theory and applications, First Edition. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2018.

Д.И. АШИХМИН, Н.М. АШАРЧУК, Ю.К. СЕДОВА,  
В.В. РОВЕНКО, В.С. ЖИГАРЬКОВ, Н.В. МИНАЕВ,  
Е.И. МАРЕЕВ, В.И. ЮСУПОВ

*Институт фотонных технологий НИЦ «Курчатовский институт», Троицк*

## **ДИНАМИКА ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ УДАРНЫХ ВОЛН И КАВИТАЦИОННЫХ ПУЗЫРЕЙ В ГИДРОГЕЛЕ ПРИ ФЕМТОСЕКУНДНОМ ПРОБОЕ**

Представлены результаты экспериментов по формированию кавитационных пузырей и ударных волн одиночными фемтосекундными лазерными импульсами в гидрогеле и воде. Время-разрешённая теневая микроскопия выявила динамику механических пост-эффектов при пробое. В гидрогеле скачок давления на фронте ударной волны уменьшается в 30 раз, а также снижаются максимальный радиус и период колебаний пузыря.

D.I. ASHIKHMIN, N.M. ASHARCHUK, Yu.K. SEDOVA,  
V.V. ROVENKO, V.S. ZHIGARKOV, N.V. MINAEV,  
E.I. MAREEV, V.I. YUSUPOV

*Institute Photon Technologies of NRC «Kurchatov Institute», Troitsk*

## **DYNAMICS OF LASER-INDUCED SHOCK WAVES AND CAVITATION BUBBLES IN HYDROGEL AT FEMTOSECOND BREAKDOWN**

The results of experiments on the formation of cavitation bubbles and shock waves by single femtosecond laser pulses in hydrogel and water are presented. Time-resolved shadow microscopy revealed the dynamics of mechanical post-effects during breakdown. In the hydrogel, the pressure surge at the shock wave front decreases by a factor of 30, as well as the maximum radius and period of oscillation of the bubble decrease.

Лазерная инженерия микробных систем - перспективное направление биопечати для выделения трудно культивируемых микроорганизмов [1], разделения симбионтов [2] и печати различных биоматериалов [3, 4]. Актуальной задачей является исключение переноса наночастиц металла, образующихся при разрушении металлического покрытия донорной подложки, в каплях геля вместе с живыми системами. Одним из подходов является реализация биопечати без поглощающей плёнки с использованием фемтосекундных лазерных импульсов [5].

Целью работы является экспериментальное исследование динамики кавитационных пузырей и ударных волн в фемтосекундной лазерной биопечати.

Экспериментальная установка (рис. 1) включает два синхронизированных при помощи генератора задержек на базе ПЛИС лазерных источника и позволяет менять задержку между лазерными импульсами с шагом  $\sim 250$  пс. В качестве импульса «накачки» использовалось излучение фемтосекундного лазера ( $\lambda = 1032$  нм,  $\tau = 200$  фс) остро сфокусированное ( $NA = 0.45$ ,  $f = 200$  мм) в кювете с гидрогелем или водой. Регистрация процессов осуществлялась при освещении фокальной области «зондирующим» наносекундным лазерным импульсом ( $\lambda = 527$  нм,  $\tau = 4$  нс) с записью изображений на матрицу цифровой камеры. Установлено, что давление на фронте ударной волны, сформированной в гидрогеле (50 МПа), в 30 раз ниже, чем в воде (1.5 ГПа). При этом период осцилляций и максимальный радиус кавитационного пузыря в гидрогеле меньше по сравнению с водой на  $\sim 25\%$  и  $\sim 10\%$ , соответственно.

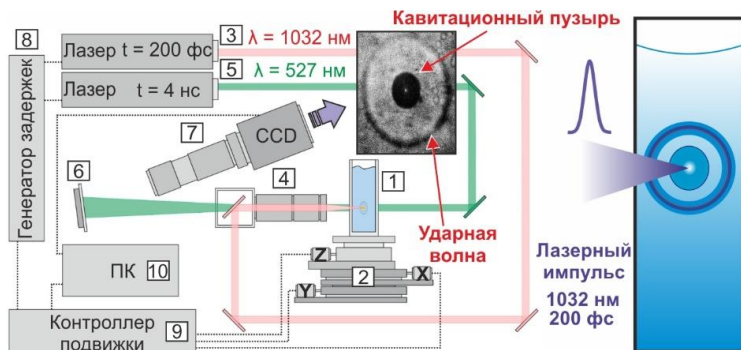


Рис. 1. Схема экспериментальной установки время-разрешённой теневой фотографии и лазерного воздействия, пример регистрируемого кадра

Работа поддержана грантом РНФ № 25-79-10125 (эксперимент) и госзаданием НИЦ «Курчатовский институт» (уникальное оборудование).

#### Список литературы

1. Gorlenko M.V., et al. // J. Biol. Eng. 2018. V. 12. P. 1-11.
2. Kochetkova T.V., et al. // Int. J. Syst. Evol. Microbiol. 2020. V. 70. P. 1192-1202.
3. Antoshin A., et al. // Bioprinting. 2023. V. 34. P. e00297.
4. Koch L., et al. // Biofabrication. 2018. V. 10. P. 35005.
5. Ashikhmin D.I., et al. // Bull. Lebedev Phys. Inst. 2024. V. 51. P. S877-S886.

А.И. ФЕРУЛЕВ<sup>1,2</sup>, В.М. КОРШУНОВ<sup>2</sup>, И.В. ТАЙДАКОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

<sup>2</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

## ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КОМПЛЕКСОВ ИОНА ЕВРОПИЯ (III) С ПЕРФТОРИРОВАННЫМИ ОРГАНИЧЕСКИМИ ЛИГАНДАМИ

В работе исследованы люминесцентные свойства новых комплексов иона  $\text{Eu}^{3+}$ . Показано снижение квантового выхода веществ при фторировании органического лиганда, не смотря на подавление процессов колебательной релаксации.

A.I. FERULEV<sup>1,2</sup>, V.M. KORSHUNOV<sup>2</sup>, I.V. TAYDAKOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University

<sup>2</sup>Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

## LUMISECENCE OF EUROPIUM (III) COMPLEXES WITH PERFLUORINATED LIGAND MOIETY

Novel  $\text{Eu}^{3+}$  complexes was comprehensively investigated in the present study. It was shown that perfluorination of ligand moiety leads to decrease of overall quantum yield despite of suppression of vibrational relaxation.

Люминесцентные материалы на основе комплексов иона европия находят широкое применение в различных сферах за счёт своего яркого излучения в видимой красной области спектра [1, 2]. Однако эффективность люминесценции подобных соединений ограничена процессами колебательной релаксации. Многообещающим подходом к снижению скорости процессов колебательной релаксации является фторирование органических лигандов координационных соединений. К сожалению, этот подход малоисследован по причине трудоёмкости синтеза таких соединений.

В данной работе были исследованы люминесцентные свойства комплексов иона европия (III) с перфторированными (pfBTFA) и нефторированными (BTFA) лигандами из класса  $\beta$ -дикетонатов. Формула веществ имеет вид  $\text{Rb}[\text{Eu}(\text{pfBTFA})_4]$  и  $\text{Rb}[\text{Eu}(\text{BTFA})_4]$  соответственно.

Спектроскопическими и фотометрическими методами, описанными в работе [3], были получены внешние и внутренние квантовые выходы соединений, а также времена жизни возбуждённых состояний, скорости излучательных и безызлучательных процессов (табл. 1).

Основные фотофизические параметры исследуемых веществ приведены в таблице 1:  $I_{615}/I_{MD}$  – отношение интенсивностей излучения полос гиперчувствительного и магнит-дипольного переходов  $Eu^{3+}$ ,  $k_{rad}$  – скорость излучательных процессов,  $k_{nrad}$  – скорость безызлучательных процессов,  $\tau_{obs}^{293}$  – время жизни возбуждённого состояния при 293 К,  $\tau_{obs}^{77}$  – время жизни возбуждённого состояния 77 К,  $\Phi_{Ln}$  – внутренний квантовый выход,  $\Phi$  – общий квантовый выход,  $\eta$  – коэффициент сенсibilизации, ПК – поликристаллическая фаза.

Таблица 1. Основные фотофизические параметры исследуемых веществ

| Комплекс                     | Фаза           | $I_{615}/I_{MD}$ | $k_{rad}, s^{-1}$ | $k_{nrad}, s^{-1}$ | $\tau_{obs}^{293}, \mu s$ | $\tau_{obs}^{77}, \mu s$ | $\Phi_{Ln}, \%$ | $\Phi, \%$ | $\eta$ |
|------------------------------|----------------|------------------|-------------------|--------------------|---------------------------|--------------------------|-----------------|------------|--------|
| Rb[Eu(pfBTFA) <sub>4</sub> ] | ПК             | 8.1              | 625               | 368                | 1084                      | 1105                     | 63              | 45         | 0.71   |
| Rb[Eu(pfBTFA) <sub>4</sub> ] | Раствор (MeCN) | 20.6             | 880               | 606                | 681                       | -                        | 59              | 6          | 0.10   |
| Rb[Eu(BTFA) <sub>4</sub> ]   | ПК             | 17.7             | 1049              | 540                | 702                       | 671                      | 66              | 54         | 0.82   |
| Rb[Eu(BTFA) <sub>4</sub> ]   | Раствор (MeCN) | 22.9             | 955               | 528                | 675                       | -                        | 64              | 24         | 0.36   |

Фторирование привело к снижению общего квантового выхода фотолюминесценции веществ как в растворе, так и в поликристаллической фазе. При этом внутренний квантовый выход не претерпевает значительных изменений, что говорит об ухудшении сенсibilизации люминесценции. Для Rb[Eu(pfBTFA)<sub>4</sub>] в растворе  $\Phi$  падает в 7,5 раз по сравнению с веществом в виде порошка. Кроме того, этот показатель у Rb[Eu(BTFA)<sub>4</sub>] в 4 раза выше в том же растворителе. Такая разница в показателе  $\Phi$  говорит о сенсibilизации люминесценции через концентрационно-зависимые состояния с переносом заряда, которые не наблюдаются в растворах [4]. Тушение люминесценции также обусловлено наличием состояний с переносом заряда, так как фторирование приводит к значительному снижению  $k_{nrad}$ , не приводя к повышению  $\Phi$ . Таким образом, фторирование лиганда не приводит к повышению квантового выхода новых комплексов, несмотря на подавление процессов колебательной релаксации.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 25-22-00387).

#### Список литературы

1. Bünzli J.-C.G. // Coordination Chemistry Reviews. 2015. V. 293. P. 19-47.
2. Eliseeva S.V., Bünzli J.-C.G. // Chemical Society Reviews. 2010. V. 39. P. 189-227.
3. Zanizdra S.R., et al. // Optical Materials. 2025. V. 160. P. 116780.
4. Polikovskiy T.A., et al. // International Journal of Molecular Sciences. 2025. V. 26. P. 6814.



Г.Л. МАКАРКИН<sup>1,2</sup>, В.В. КЕСАЕВ<sup>2</sup>, А.Н. ЛОБАНОВ<sup>2</sup>,  
С.А. АМБРОЗЕВИЧ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

<sup>2</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

## **ПОЛЯРИЗОВАННАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ДЕФОРМИРОВАННОЙ ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЫ С ВНЕДРЁННЫМ ОРГАНИЧЕСКИМ КРАСИТЕЛЕМ**

Экспериментально продемонстрирована возможность люминесцентного контроля напряженно-деформированного состояния с помощью измерения поляризации люминесценции растянутых полимерных образцов с внедрённым органическим красителем.

G.L. MAKARKIN<sup>1,2</sup>, V.V. KESAEV<sup>2</sup>, A.N. LOBANOV<sup>2</sup>,  
S.A. AMBROZEVICH<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University

<sup>2</sup>Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

## **POLARIZED LUMINESCENCE OF A DEFORMED POLYMER MATRIX WITH AN INCORPORATED ORGANIC DYE**

The possibility of luminescent monitoring of the stress-strain state has been experimentally demonstrated by measuring the luminescence polarization of stretched polymer samples with an embedded organic dye.

Неразрушающий контроль напряженно-деформированного состояния является актуальной задачей, поскольку до сих пор имеющиеся методы либо требуют применения интерферометрических измерений [1 - 3], что не всегда доступно, либо же для контроля напряжений прибегают к засверливанию элементов конструкций [1, 2], которое само по себе может в дальнейшем явиться аттрактором напряжений и инициировать разрушение. Настоящая работа посвящена разработке нового метода контроля, предполагающего измерение поляризации люминесценции органического красителя, внедренного в растягивающуюся полимерную матрицу.

В качестве объекта исследования была выбрана силиконовая матрица Silcotin 10 производства «Химснабкомпозит», в которую был внедрен краситель Poly [ 2 – methoxy – 5 - ( 2 – ethylhexyloxy ) - 1,4 -

phenylenevinylene] (МЕН-PPV) производства Sigma Aldrich. Из матрицы с красителем были изготовлены образцы плёнок толщиной порядка 1 мм и длиной в несколько сантиметров.

Возбуждение образца проводилось с помощью линейно поляризованного лазерного излучения 532 нм, направленного по нормали к поверхности плёнки, которую растягивали в латеральном направлении с максимальным относительным удлинением до 250 %. Вращение плоскости поляризации возбуждения осуществляли с помощью полуволновой пластины. Интегральную интенсивность люминесценции измеряли с помощью фотодиода ФД-24К в двух поляризациях регистрации – вдоль направления растяжения образца, а также перпендикулярно этому направлению.

Результаты измерений представлены на рис. 1 для двух наиболее репрезентативных углов между поляризацией лазерного возбуждения и направлением растяжения образца – 30 и 60°. Общее уменьшение интенсивности с растяжением обусловлено уменьшением количества молекул красителя, попадающих в лазерное пятно. Существенное различие сигналов для разных поляризаций возбуждения свидетельствует о применимости такого подхода для регистрации деформаций и может стать основой для создания промышленной методики контроля напряженно-деформированного состояния конструкций.

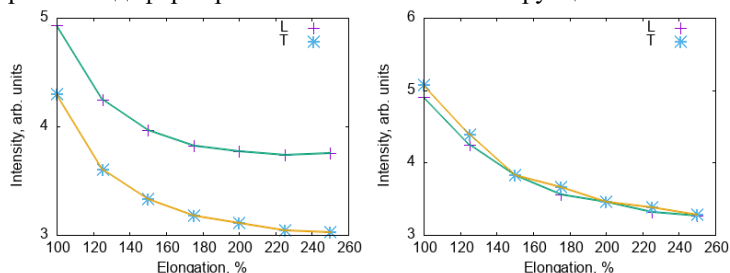


Рис. 1. Интенсивность люминесценции образца полимерной плёнки с внедрённым красителем при растяжении, регистрируемая в поляризации вдоль (L) и поперек (T) направления растяжения, угол между поляризацией возбуждения и направлением растяжения 60° (слева), 30° (справа)

#### Список литературы

1. Фрохт М.М. Фотоупругость: в 2 т. Т. 1. М.: Гостехиздат, 1952.
2. Метод фотоупругости / под ред. С.Е. Стрельчука, Я.Е. Хесина. В 3 т. Т. 1. М.: Стройиздат, 1975.
3. Кесаев В.В., Барбашов В.А., Путилин Н.А., Копенкин С.С., Лобанов А.Н., Амброзевич С.А. Частично поляризованная флуоресценция механически напряженного полиуретанового диска // Письма в ЖТФ. 2025. Т. 51. Вып. 8. С. 58-62.

Т.В. КОРОЛЕВА<sup>1</sup>, К.Т. ХАКИМОВ<sup>1</sup>, О.В. ВЕРШИНИНА<sup>1</sup>,  
О.А. САПЦОВА<sup>1</sup>, В.О. ЯКОВЛЕВ<sup>1</sup>, А.Г. МЕДВЕДЕВ<sup>1</sup>, В.С. ПОПОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

<sup>2</sup>АО «НПО «Орион», Москва

## РОДАНИДНЫЙ КОМПЛЕКС РТУТИ В КАЧЕСТВЕ ПРЕКУРСОРА ДЛЯ СИНТЕЗА КОЛЛОИДНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК HgTe ДЛЯ ИК-ФОТОСЕНСОРОВ

В данной работе для синтеза коллоидных квантовых точек (ККТ) впервые использован роданидный комплекс ртути  $\text{NH}_4[\text{HgCl}_2(\text{SCN})]$ . Выполнена характеристика комплекса с помощью метода порошковой дифракции и ИК-Фурье-спектроскопии. Синтезированы ККТ HgTe и приведена зависимость морфологии и оптических свойств ККТ в зависимости от температуры, времени синтеза и использованного прекурсора. Измерены электрофизические свойства полученных фотосенсоров на основе ККТ HgTe.

T.V. KOROLEVA<sup>1</sup>, K.T. KHAKIMOV<sup>1</sup>, O.V. VERSHININA<sup>1</sup>,  
O.A. SAPTSOVA<sup>1</sup>, V.O. YAKOVLEV<sup>1</sup>, A.G. MEDVEDEV<sup>1</sup>, V.S. POPOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

<sup>2</sup>State Research Center «Orion», Moscow

## MERCURY THIOCYANATE COMPLEX AS A PRECURSOR FOR THE SYNTHESIS OF HgTe COLLOIDAL QUANTUM DOTS FOR IR PHOTODETECTORS

Mercury thiocyanate complex  $\text{NH}_4[\text{HgCl}_2(\text{SCN})]$  was used for the synthesis of quantum dots (QDs) for the first time. The complex was characterized using powder X-ray diffraction and FT-IR spectroscopy. HgTe QDs were synthesized, and the dependence of QDs morphology and optical properties on temperature, synthesis time, and the precursor used is presented. The electrophysical properties of the obtained HgTe QD-based photodetectors were measured.

В настоящее время коллоидные квантовые точки (ККТ) теллурида ртути широко исследуются в качестве активного слоя для фоточувствительных элементов [1]. Для получения ККТ HgTe часто используют метод горячей инъекции, позволяющий получить наиболее узкое распределение наночастиц по размерам [2]. В данном методе размер ККТ зависит от температуры и времени реакции. Благодаря проявлению квантоворазмерного эффекта возможно изменять длину волны

поглощения ККТ в зависимости от их размера, а, следовательно, и создавать фоточувствительные плёнки на основе ККТ с заданным диапазоном поглощения [3]. Один из недостатков жидкостных методов синтеза – возможность образования нежелательных поверхностных состояний во время синтеза, впоследствии отрицательно влияющих на фоточувствительность получаемых слоёв ККТ [4]. В данной работе впервые предложено использовать в качестве прекурсора роданидный комплекс хлорида ртути. Дополнительная координация центрального атома с роданидной группой (SCN) может предотвратить координацию с молекулами воды и уменьшить образование гидроксильных ловушек.

Целью работы является исследование влияния природы прекурсора на морфологию и оптические свойства получаемых ККТ HgTe в зависимости от температуры и времени синтеза. Были получены ККТ HgTe с использованием двух прекурсоров: коммерчески доступного хлорида ртути ( $\text{HgCl}_2$ ) и роданидного комплекса ртути ( $\text{NH}_4[\text{HgCl}_2(\text{SCN})]$ ) при температуре синтеза 80 и 100 °C, и времени синтеза 15, 30, 60 и 90 мин. Исследование морфологии ККТ проводилось с помощью просвечивающей электронной микроскопии. Средний размер наночастиц увеличивался как при увеличении времени, так и температуры синтеза. Так для ККТ, полученных с использованием прекурсора  $\text{NH}_4[\text{HgCl}_2(\text{SCN})]$  средний размер увеличивался с 3,9 до 8,1 нм, тогда как для ККТ, полученных с использованием  $\text{HgCl}_2$  средний размер увеличивался с 4,3 до 9,7 нм. Для характеристики оптических свойств коллоидных квантовых точек HgTe был использован метод ИК-Фурье-спектроскопии. Спектры снимали с тонких плёнок ККТ на приставке многократного нарушенного полного внутреннего отражения (МНПВО). Увеличение температуры и времени синтеза приводит к уширению пика поглощения. Наиболее узкие пики поглощения характерны для ККТ HgTe, синтезированных при 80°C и времени синтеза 15 и 30 мин. Для ККТ HgTe, полученных с использованием прекурсора  $\text{NH}_4[\text{HgCl}_2(\text{SCN})]$ , характерен пик поглощения в более коротковолновой области спектра (2,2 - 3,7 мкм) по сравнению с ККТ HgTe, полученных при тех же условиях, но с использованием прекурсора  $\text{HgCl}_2$  (2,4 - 3,9 мкм). Таким образом, показано влияние природы прекурсора на морфологию синтезируемых ККТ HgTe и фотофизические свойства плёнок на их основе.

#### *Список литературы*

1. Пономаренко В.П., Попов В.С. и др. // Успехи химии. 2024. Т. 93. № 4. RCR5113.
2. Gréboval C., et al. // Chemical Reviews. 2021. V. 121. No. 7. P. 3627-3700.
3. Xue X., Hao Q., Chen M. // Light: Science & Applications. 2024. V. 13. No. 1. P. 89.
4. Wang C., et al. // Advanced Science. 2023. V. 10. No. 4. P. 2204655.

Т.С. МИСНИКОВА, В.Ф. ЛЕБЕДЕВ

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

## **ДИАГНОСТИКА C, NV<sup>-</sup>: НРПТ АЛМАЗА КАК НОВОГО ЛАЗЕРНОГО МАТЕРИАЛА**

Предложены две оптические схемы регистрации спектрально-временных характеристик суперлюминесценции НРПТ алмаза с NV<sup>-</sup>-центрами. Проведён анализ излучения, распространяющегося внутри кристалла и выходящего за его пределы, включая анализ направленности пучка излучения, выходящего из образца, и распределения интенсивности в его поперечном сечении.

T.S. MISNIKOVA, V.F. LEBEDEV

*Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

## **DIAGNOSTICS OF C, NV<sup>-</sup>: НРПТ DIAMOND AS A NEW LASER MATERIAL**

Two optical schemes for recording the spectral-temporal characteristics of the НРПТ superluminescence of diamond with NV<sup>-</sup> centers are proposed. The analysis of radiation propagating inside and outside the crystal is carried out, including an analysis of the directivity of the radiation beam exiting the sample and the intensity distribution in its cross-section.

В [1] впервые получена лазерная генерация на NV<sup>-</sup>: НРПТ алмазе, но при достаточно низкой эффективности, что привело к необходимости проведения более детальных исследований. В [2] выявлено два вида суперлюминесценции (СЛ): широкополосная и узкополосная ( $\lambda = 705 - 725$  нм), причём последняя лежит в основе импульсной генерации [1].

Цель настоящей работы – диагностика спектрально-временных характеристик СЛ путём сравнения двух оптических схем регистрации. Оптическая накачка образца осуществлялась сходящимся пучком излучения импульсного Nd:YAG лазера ( $\lambda = 532$  нм при  $E_p \approx 25$  мДж), сформированным цилиндрической линзой с  $f = 300$  мм. В первой регистрировалось излучение, исходящее из внутренней области образца, изготовленного в виде пластины, а во второй – излучение, рассеянное экраном, установленным в выходящем из торца пластины пучке излучения и сфокусированным на экран сферической линзой (рис. 1). Во второй схеме CCD-камерой также измерялось распределение

интенсивности излучения в поперечном сечении пучка. Применялась и комбинированная накачка одновременно излучениями импульсного Nd:YAG и непрерывного лазеров ( $\lambda = 403$  нм), влияние которой было выявлено ранее [4].

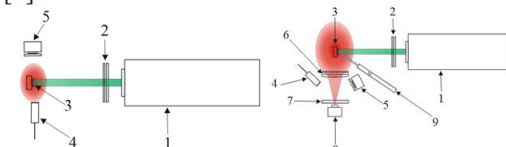


Рис. 1. Оптические схемы измерений: 1 – Nd-YAG-лазер, 2 – поляризационный ослабитель, цилиндрическая линза со ослабляющим светофильтром, 3 – образец, 4 – конденсор, соединённый оптическим волокном со спектрометром, 5 – скоростной фотоприёмник с отрезающим излучение накачки светофильтром, подключённый к осциллографу, 6 – фокусирующая линза со светофильтром, 7 – выдвигной экран, 8 – CCD-камера, 9 – непрерывный лазер,  $\lambda = 403$  нм

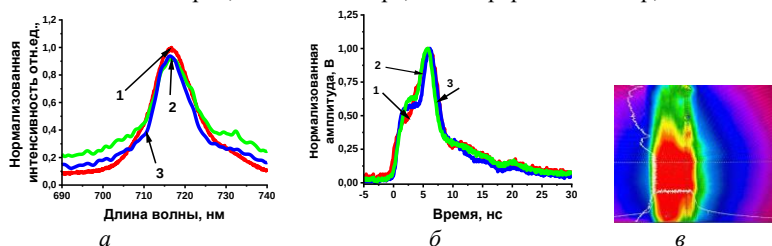


Рис. 2. Зависимости формы спектров (а) и импульсов (б) СЛ от вида схемы регистрации: 1 – излучение в алмазе; 2 – излучение, выходящее из алмаза; 3 – излучение, выходящее из алмаза при комбинированной накачке, распределение интенсивности излучения в поперечном сечении пучка, выходящего из образца (в) для зависимости 2

Установлено сходство форм спектров и импульсов излучения независимо от конфигурации оптической схемы (рис. 2). Сопоставление спектрально-временных и пространственных характеристик излучения, полученных с применением обеих схем регистрации, приводит к выводу, что в проведённом эксперименте присутствует СЛ с одинаковыми продольными модами.

#### Список литературы

1. Genin D., Lipatov E., et al. // Phys. Status Solidi RRL. 2023.
2. Lebedev V.F., Vasilev E.A., et al. // Diamond and Related Materials. 2024. V. 150. P. 111763.
3. Мисникова Т.С. // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2025. Т. 23. № 4. С. 64-70.
4. Лебедев В.Ф., Мисникова Т.С. и др. // Физические основы приборостроения. 2024. Т. 13. № 4 (54). С. 80-85.

А.К. МАРТЬЯНОВ<sup>1</sup>, И.А. ТЯЖЕЛОВ<sup>1</sup>, Р.В. РОМАЩЕНКО<sup>1,2</sup>,  
В.С. СЕДОВ<sup>1</sup>, А.Ф. ПОПОВИЧ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

<sup>2</sup>*МИРЭА – Российский технологический университет, Москва*

## **СНИЖЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ТОЛСТЫХ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ АЛМАЗНЫХ ПЛЁНОК НЕПОСРЕДСТВЕННО В ПРОЦЕССЕ CVD-ОСАЖДЕНИЯ**

Исследованы толстые многослойные алмазные плёнки с различным количеством нанокристаллических прослоек, синтезированные методом MPCVD. Показано, что чередование МКА/НКА слоёв обеспечивает значительное снижение шероховатости при сохранении высокого структурного качества материала. Результаты демонстрируют перспективность многослойной архитектуры для создания функциональных алмазных покрытий с управляемыми свойствами.

A.K. MARTYANOV<sup>1</sup>, I.A. TIAZHELOV<sup>1</sup>, R.V. ROMASHCHENKO<sup>1,2</sup>,  
V.S. SEDOV<sup>1</sup>, A.F. POPOVICH<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*

<sup>2</sup>*MIREA - Russian Technological University, Moscow*

## **REDUCING THE ROUGHNESS OF THICK POLYCRYSTALLINE DIAMOND FILMS DIRECTLY DURING THE CVD DEPOSITION PROCESS**

Thick multilayer diamond films with varying numbers of nanocrystalline interlayers, synthesized by MPCVD, were studied. It was shown that alternating MCD / NCD layers significantly reduces roughness while maintaining high structural quality. The results demonstrate the potential of multilayer architecture for creating functional diamond coatings with controlled properties.

В работе представлены результаты исследования многослойных алмазных плёнок толщиной 100 мкм, состоящих из чередующихся слоёв микрокристаллического (МКА) и нанокристаллического (НКА) алмаза. Изучены серии структур с различным количеством НКА-прослоек (0, 10, 22, 44, 75 и 100) при фиксированной общей толщине. Целью исследования являлось определение влияния архитектуры покрытия и режимов его получения на морфологию поверхности, структурные особенности и функциональные параметры материала. Такой подход позволяет управлять

шероховатостью, внутренними напряжениями и тепловыми характеристиками толстых алмазных плёнок [1].

Синтез осуществлялся методом MPCVD на установке ARDIS-100 (2,45 ГГц, 5 кВт). Для формирования НКА использовались инъекции азота при заданных расходах  $N_2 / CH_4 / H_2 = 5 / 20 / 475$  ссст. Толщина плёнок контролировалась *in situ* лазерной интерферометрией. Характеризация проводилась методами КР-спектроскопии и оптического профилометрического анализа ZYGO NewView 5000.

Получено существенное снижение шероховатости поверхности при увеличении числа НКА-прослоек: от 3675 нм для однослойной МКА-плёнки до 211 нм для структуры со 100 слоями НКА. Переходы между слоями приводят к эффективному подавлению роста МКА и сглаживанию рельефа поверхности, что хорошо согласуется с данными микроскопии (рис. 1). Результаты усреднённых измерений шероховатости для всей серии образцов приведены на рис. 2. Минимальные значения достигаются при 75 - 100 НКА-слоях, что делает такие структуры перспективными для применения в оптике и электронике, где критична низкая шероховатость толстых алмазных плёнок.

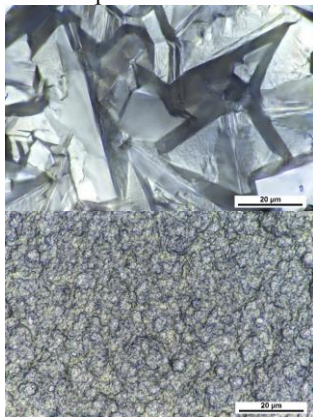


Рис. 1. Поверхность МКА-образца без прослоек NCD) и образца с 100 слоями NCD

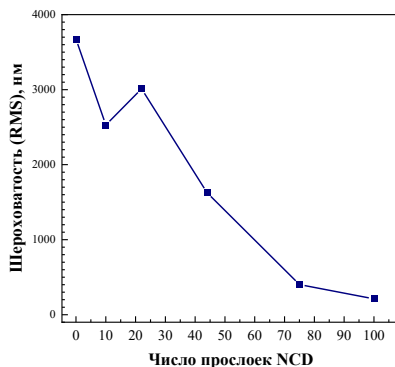


Рис. 2. Зависимость шероховатости от числа прослоек NCD в выращенных пластинах

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 25-72-10131.

#### Список литературы

1. Martyanov A.K., Sedov V.S., et al. // Doklady Physics. 2021. V. 66 (2). P. 42-44.



Д.А. ПОМАЗКИН, П.А. ДАНИЛОВ, В.Г. ВИНС, М.Л. СКОРИКОВ,  
С.И. КУДРЯШОВ, С.В. ВЯТКИН<sup>1</sup>, Ф.В. ДУОНГ<sup>2</sup>, Ф.Х. МИН<sup>2</sup>

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

*<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

*<sup>2</sup>Институт физики Вьетнамской академии наук и технологий, Ханой, Вьетнам*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЗ-ЦЕНТРОВ В АЛМАЗЕ**

НЗ (N2V) центры алмаза крайне перспективны в качестве активной среды для лазерной генерации. Однако прямые измерения сечения поглощения ранее не проводились, что затрудняет проектирование лазерных систем и определение малых концентраций. В работе представлены результаты измерений сечения поглощения НЗ-центров прямым методом насыщения поглощения в природных и синтетических образцах. Дополнительно сечение поглощения было измерено косвенным методом по кинетике затухания. Значения прямых измерений  $1.1 \times 10^{-16} \text{ см}^2$  полученными косвенным методом  $1.6 \times 10^{-16} \text{ см}^2$ , что указывает на корректность метода.

D.A. POMAZKIN, P.A. DANILOV, V.G. VINS, M.L. SKORIKOV,  
S.I. KUDRYASHOV, S.V. VYATKIN<sup>1</sup>, P.V. DUONG<sup>2</sup>, P.H. MINH<sup>2</sup>

*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

*<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University*

*<sup>2</sup>Institute of Physics of Vietnamese Academy of Science and Technology, HaNoi, Vietnam*

## **RESEARCH OF PHOTOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF H3 CENTERS IN DIAMOND**

H3 (N2V) centers in diamond are highly promising as an active medium for laser generation. However, the absence of prior direct measurements of the absorption cross section has hindered laser system design and lower concentration estimation. This talk presents measurements of the H3-center absorption cross section using the direct absorption saturation method in natural and synthetic diamond samples. Additionally, the absorption cross section was measured indirectly from photoluminescence decay kinetics. The directly measured value of  $1.1 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$  is in a good agreement with the indirectly obtained one  $1.6 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ , indicating the accuracy of the direct method

Центры окраски в алмазе играют ключевую роль в современной фотонике: от квантовых вычислений до источников одиночных фотонов, датчиков магнитного поля и активных сред для лазеров [1, 2]. Корректное

проектирование подобных систем требует достоверных значений основных фотофизических параметров примесных центров. Несмотря на детальное исследование NV-центров [3], другие центры, такие как НЗ (N2V) остаются изученными существенно меньше.

В работе выполнены прямые измерения сечения поглощения НЗ-центров методом насыщения поглощения на образцах с высоким содержанием НЗ. Полученное значение  $1.1 \times 10^{-16} \text{ см}^2$  согласуются с оценкой  $1.6 \times 10^{-16} \text{ см}^2$ , ранее выведенной из кинетики затухания фотолюминесценции [4]. Результат может быть использован для количественной оценки концентраций НЗ-центров при различной степени легирования, в том числе и очень низкой, и служит основой для дальнейших исследований лазерной генерации на НЗ-центрах.

*Список литературы*

1. Aharonovich I., Neu E. Diamond nanophotonics //Advanced Optical Materials. 2014. V. 2. No. 10. P. 911-928.
2. Mironov V.P., et al. Generation of laser radiation by color centers in diamond crystals //AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, 2021. V. 2392. No. 1.
3. Subedi S.D., et al. Laser spectroscopic characterization of negatively charged nitrogen-vacancy (NV-) centers in diamond //Optical Materials Express. 2019. V. 9. No. 5. P. 2076-2087.
4. Rand S. Synthetic diamond for color center lasers // Advanced Solid State Lasers. Optica Publishing Group, 1986. P. FA9.

М.К. ЕСЕЕВ, Д.Н. МАКАРОВ, С.В. ЯШИН, А.А. КОСТИН  
*Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова,  
Архангельск*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ  
В КОМПАКТНОМ ШИРОКОДИАПАЗОННОМ  
ИЗМЕРИТЕЛЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОСНОВЕ  
МНООКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ АЛМАЗНЫХ ПЛАСТИН  
С АЗОТНО-ВАКАНСИОННЫМИ ЦЕНТРАМИ**

Приведены результаты экспериментов по оптимизации процессов детектирования сигналов ОДМР в устройстве для измерения магнитного поля на основе алмазной пластины с NV-центрами.

M.K. ESEEV, D.N. MAKAROV, S.V. YASHIN, A.A. KOSTIN  
*Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk*

**INVESTIGATION OF PHOTOLUMINESCENCE PROCESSES  
IN A COMPACT WIDE-RANGE MAGNETIC FIELD METER  
BASED ON MULTI-CRYSTALLINE DIAMOND PLATES  
WITH NITROGEN VACANCY CENTERS**

The results of experiments on optimizing the detection of ODMR signals in a device for measuring a magnetic field based on a diamond plate with NV centers are presented.

Квантовые магнитометры позволяют измерять магнитные поля с прецизионной точностью. Такая точность достигается из-за природы квантовых магнитометров. Они основываются на квантовых принципах и физических константах, в отличие от классических, типа феррозондовых датчиков или датчиков Холла. Существует несколько видов квантовых магнитометров, большинство из которых имеют возможность измерения только при сверхнизких температурах [1]. Однако, для их более практического применения, необходимо привести рабочую температуру чувствительного элемента комнатной и при такой температуре получить стабильную работу устройства, подобно классическим решениям. ОДМР подразумевает оптическую накачку лазером с длиной волны 532 нм среды (алмазной пластины с NV-центрами) в поле СВЧ-излучения и регистрацию флуоресцентного излучения при переходах в NV-центрах [2, 3]. Параметры фотолюминесценции – интенсивность и времена

релаксации при этом определяются внешними магнитными полями, вследствие эффекта Зеемана. Использование алмаза с центром окраски обосновано его химической и физической инертностью и возможностью измерения магнитного поля методом ОДМР при комнатной температуре.

Целью работы является исследование процессов стабилизации температурных параметров и фильтрации сигнала фотолюминесценции, возникающей на синтетических алмазах с NV-центрами окраски в компактном измерителе магнитного поля, работающего на основе метода оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР). Предварительно авторами была исследованы параметры синтеза и постростового инжиниринга алмазных пластин с NV-центрами [4, 5]. Система детектирования магнитного поля состоит из следующих компонентов: фотодетектор, усилитель, синхронный детектор, АЦП, микроконтроллер, генератор СВЧ-поля, лазер (рис. 1). Микроконтроллер используется для общения, настройки и чтения задействованных чипов. Система позволяет считывать ОДМР в известных условных единицах. В работе выявлена температурная зависимость сигналов ОДМР и предложены методы стабилизации этой зависимости для повышения точности измерений, также предоставлены методы обработки сигналов фотолюминесценции и целью подавления шумов и наводок.

Работа выполнена при финансовой поддержке госзадания № FSRU-2024-0005.

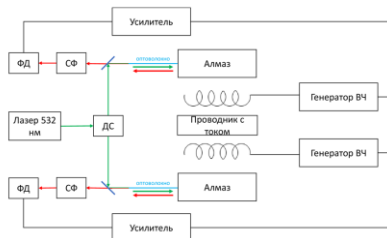


Рис. 1. Принципиальная схема магнитометра

#### Список литературы

1. Clarke J., Braginski A.I., et al. The SQUID Handbook. 2006.
2. Hatano Y., et al. High-precision robust monitoring of charge/discharge current over a wide dynamic range for electric vehicle batteries using diamond quantum sensors // Sci. Rep. 2022. V. 12. P. 13991.
3. Stürner M., et al. Integrated and portable magnetometer based on nitrogen-vacancy ensembles in diamond // arXiv:2012.01053. 2020.
4. Meshkov I.N., Eseev M.K., Kuziv I.V., et al. // Phys. Part. Nuclei Lett. 2024. V. 21. P. 526.
5. Костин А.А., Подойлов И.О., Харламова А.А. и др. // Журнал технической физики. 2025. Т. 95 (3). С. 505.

В.Ф. ЛЕБЕДЕВ, Т.С. МИСНИКОВА, Я.А. РЫВКИНА  
*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического  
приборостроения*

## **СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННЫЕ СВОЙСТВА СУПЕРЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ С, NV<sup>-</sup>: HPHT АЛМАЗА**

Экспериментально определены характерные особенности вынужденного излучения, лежащего в основе импульсной лазерной генерации на синтетическом HPHT алмазе с NV<sup>-</sup>-центрами окраски. Получение гладкого спектра и короткого импульса излучения определяется: наличием в кристалле достаточной концентрации центров одиночного азота, абсолютной концентрацией NV<sup>-</sup>-центров, величиной объёма активной среды с инверсией населённостей, энергией импульса накачки.

V.F. LEBEDEV, T.S. MISNIKOVA, Ya.A. RYVKINA  
*Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

## **SPECTRAL-TEMPORAL PROPERTIES OF SUPERLUMINESCENCE OF C, NV<sup>-</sup>: HPHT DIAMOND**

The characteristic features of stimulated emission underlying pulsed laser generation on synthetic HPHT diamond with NV<sup>-</sup> color centers have been experimentally determined. Obtaining a smooth spectrum and a short radiation pulse is determined by the presence of a sufficient concentration of single nitrogen centers in the crystal, the absolute concentration of NV<sup>-</sup> centers, the volume of the active medium with population inversion, and the energy of the pumping pulse.

В работе [1] впервые показано, что в NV<sup>-</sup>: HPHT алмазе присутствуют одновременно два вида вынужденного излучения (суперлюминесценции (СЛ)) – широкополосная и узкополосная (рис. 1, 2). Узкополосная СЛ – основа лазерной генерации; возникает только при импульсной накачке и при достаточно большом превышении значений концентрации С-центров над NV<sup>-</sup>-центрами [1, 2]. Невысокий КПД лазерной генерации [3] объясняется тем, что в настоящее время не вполне ясны механизм и динамика инициирования СЛ в системе NV<sup>-</sup>-С центров.

В настоящей работе продолжено изучение временных и спектральных характеристик узкополосной СЛ. Исследовался С, NV<sup>-</sup>: HPHT алмаз в виде односекторной {111} пластины [2] с размерами 5 x 5 x 0.8 мм<sup>3</sup> и концентрациями NV<sup>-</sup>- и С-центров на уровне  $\approx 11$  и  $\approx 50$  ppm

соответственно. Оптическая накачка образца осуществлялась сфокусированным цилиндрической линзой ( $f = 60$  мм) импульсным излучением Nd-YAG лазера ( $\lambda = 532$  нм). Образец помещался на таком расстоянии, где объём в пластине с инверсией населённостей вдвое превышал подобный объём в перетяжке пучка накачки. В этом случае спектр узкополосной СЛ приобретает гладкую форму [2].

Обнаружено, что с ростом энергии импульса накачки  $E_{\text{нак}}$  увеличение интенсивности широкополосной СЛ носило линейный характер, а узкополосной – нелинейный. Причём, пиковый режим импульсов СЛ трансформируется в моноимпульс с ростом энергии импульса накачки  $E_{\text{нак}}$ , когда значения интенсивности узкополосной СЛ находились вблизи насыщения (приведено на вставках рис. 2). Снижение интенсивности пиков в импульсе СЛ носит экспоненциальный характер и уменьшается в  $e$  раз за сопоставимое с временем жизни верхнего возбуждённого состояния NV-центров  $\approx 10 - 15$  нс, что похоже на режим свободной генерации. А уменьшение длительности импульсов СЛ с ростом  $E_{\text{нак}}$  может объясняться явлением самопросветления активной среды.

Определены основные параметры как активной среды, так и оптической накачки для получения СЛ высокой интенсивности, однако их количественное выражение требует проведения дальнейших исследований не на отдельных образцах, а на сериях с монотонным изменением свойств.

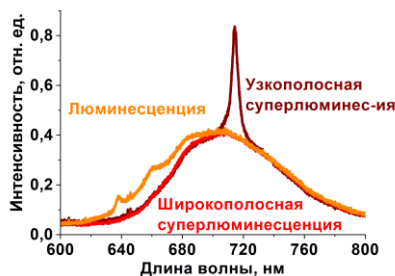


Рис. 1. Два типа СЛ в системе C-NV-центров

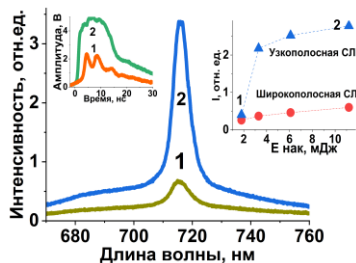


Рис. 2. Спектры и импульсы (вст.) СЛ.  $E_{\text{нак}}$ , мДж: 1-1.8, 2-11.2, вставка – рост интенсивности СЛ от  $E_{\text{нак}}$

#### Список литературы

1. Lebedev V.F., Vasilev E.A., et al. // *Diamond and Related Materials*. 2024. V. 150. P. 111763.
2. Лебедев В.Ф., Васильев Е.А., Рывкина Я.А. и др. // *Квантовая электроника*. 2024. Т. 52. № 11. С. 678.
3. Genin D., Lipatov E., et al. // *Phys. Status Solidi RRL*. 2023.

И.А. ТЯЖЕЛОВ, А.К. МАРТЪЯНОВ, В.С. СЕДОВ,  
С.В. КУЗНЕЦОВ, П.С. ЗАВЬЯЛОВ<sup>1</sup>, С.Н. МАКАРОВ<sup>1</sup>,  
Д.В. КАРПОВ<sup>1</sup>, К.Э. КУПЕР<sup>2</sup>

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

<sup>1</sup>*Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН,  
Новосибирск*

<sup>2</sup>*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск*

## **АЛМАЗНЫЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ МОНИТОРЫ ПУЧКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ: СИНТЕЗ И ИСПЫТАНИЕ**

Приведены результаты исследований композитных алмазных сцинтилляторов с включениями YAG:Ce. Проведены CVD-синтез, структурная и оптическая характеристика образцов, а также их испытания при фокусировке рентгеновского пучка на линии накопительного кольца ВЭПП-3. Показано, что композитные образцы эффективно визуализируют пучок с пиковой энергией фотонов 8,869 кэВ.

I.A. TIAZHELOV, A.K. MARTYANOV, V.S. SEDOV,  
S.V. KUZNETSOV, P.S. ZAV'YALOV<sup>1</sup>, S.N. MAKAROV<sup>1</sup>,  
D.V. KARPOV<sup>1</sup>, K.E. KUPER<sup>2</sup>

*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*

<sup>1</sup>*Tecnological Design Institute of Scientific Instrument Engineering of the Siberian  
Branch of the RAS, Novosibirsk*

<sup>2</sup>*Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk*

## **DIAMOND LUMINESCENT BEAM MONITORS OF SYNCHROTRON RADIATION: SYNTHESIS AND TESTING**

The results of studies on composite diamond scintillators containing YAG:Ce inclusions are presented. CVD synthesis, structural and optical characterization of the samples, as well as their testing during X-ray beam focusing at the VEPP-3 storage ring beamline, were performed. It is shown that the composite samples effectively visualize the beam with a peak photon energy of 8.869 keV.

Сцинтилляционные материалы активно применяются для регистрации и визуализации ионизирующего излучения, включая рентгеновское и  $\gamma$ -излучение, генерируемое синхротронными источниками и лазерами на свободных электронах [1]. Ключевые эксплуатационные параметры таких материалов – высокий световыход, химическая инертность и

радиационная стойкость. Наиболее распространённые неорганические сцинтилляторы ( $\text{CsI:Tl}^+$ , BGO,  $\text{CsPbBr}_3$  и другие) эффективно преобразуют рентгеновские кванты в фотоны видимого диапазона, однако обладают низкой термо- и влагостойкостью [2]. Алмаз с его рекордной теплопроводностью, химической инертностью и радиационной стойкостью рассматривается как перспективная матрица для сцинтилляторов нового поколения. Введение люминесцентных включений повышает эффективность рентгеновозбуждаемой люминесценции и позволяет создавать композиты [3, 4], сочетающие прозрачность и стабильность алмаза с высоким световыходом люминофоров.

Цель работы является экспериментальное исследование поликристаллических алмазных композитов с частицами YAG:Ce, включая CVD-синтез, структурную и оптическую характеризацию, а также испытания при фокусировке высокоинтенсивного рентгеновского пучка. На рис. 1 показано поперечное сечение синтезированного образца, демонстрирующее полную инкапсуляцию люминесцентных частиц в микрокристаллическом алмазе. Испытания образцов проводились на линии накопительного кольца ВЭПП-3 с полихроматическим импульсным пучком (1 Гц, пиковая энергия фотонов 8,869 кэВ, ток 30 мА) (рис. 2). Разработанный композит показал стабильность при облучении и высокую разрешающую способность при диагностике синхротронного пучка.

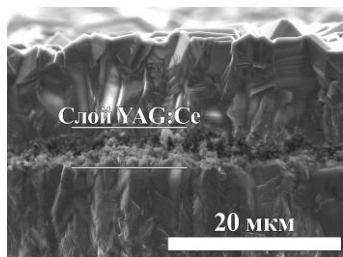


Рис. 1. РЭМ-снимок поперечного сечения композитного образца «алмаз-YAG:Ce»

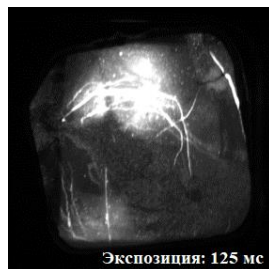


Рис. 2. Фотография композитного образца под рентгеновским облучением

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-13-00401-П.

#### *Список литературы*

1. Ou X., Qin X., et al. // Nature. 2021. V. 590 (7846). P. 410-415.
2. Qadr H.M. // Journal of Physical Chemistry and Functional Materials. 2020. V. 3. P. 24-27.
3. Sedov V.S., Kuznetsov S.V., et al. // Functional Diamond. 2022. V. 5. P. 53-63.
4. Martyanov A.K., Tiazhelov I.A., et al. // Carbon. 2024. V. 222. P. 118975.



В.Г. ЕФРЕМЕНКО, И.В. МАРТЫНОВ<sup>1</sup>, Е.А. АНТОНЬЧЕВА,  
А.А. УШКОВ<sup>1</sup>, А.А. ВИШНЕВЫЙ<sup>1</sup>, Г.И. ЦЕЛИКОВ<sup>1</sup>,  
А.В. АРСЕНИН<sup>1,2</sup>, А.В. СЮЙ<sup>1</sup>

*Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск*

<sup>1</sup>*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный*

<sup>2</sup>*Исследовательский центр новых технологий XPANCEO, Дубай, ОАЭ*

## **ФОТОТЕРМИЧЕСКОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОГО СВЕТА НА НАНОЧАСТИЦАХ TiN, Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> И Au**

Проведено сравнительное теоретическое моделирование фототермических характеристик плазмонных наночастиц золота (Au), нитрида титана (TiN) и двумерного Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> MXene. Применена интегральная фототермическая эффективность для адекватной оценки производительности материалов в реальном солнечном спектре (AM1.5G). Показано, что TiN и Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> превосходят золото не только по интегральной мощности поглощения, но и по размеронезависимой эффективности преобразования, достигая IPCE > 90 % в диапазоне диаметров от 20 до 100 нм. Продемонстрировано, что эффективность Au резко падает при отклонении от оптимального размера из-за доминирующих потерь на рассеяние. Обнаруженная размеронезависимость TiN и Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> устраняет главный технологический барьер, присущий благородным металлам, и выделяет эти дешёвые и термически стабильные соединения как перспективную основу для масштабируемых фототермических систем нового поколения.

V.G. EFREMENKO, I.V. MARTYNOV<sup>1</sup>, E.A. ANTONYCHEVA,  
A.A. USHKOV<sup>1</sup>, A.A. VISHNEVY<sup>1</sup>, G.I. TSELIKOV<sup>1</sup>,  
A.V. ARSENIN<sup>1,2</sup>, A.V. SYUY<sup>1</sup>

*Far Eastern State Transport University (Khabarovsk)*

<sup>1</sup>*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny*

<sup>2</sup>*Emerging Technologies Research Center XPANCEO, Dubai, UAE*

## **PHOTOTHERMAL CONVERSION OF SUNLIGHT ON TiN, Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> AND Au NANOPARTICLES**

A comparative theoretical modeling of the photothermal characteristics of gold (Au), titanium nitride (TiN), and two-dimensional Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> MXene plasmonic nanoparticles has been performed. The integral photothermal efficiency, has been introduced to adequately assess the performance of materials in the real solar spectrum (AM1.5G). It has been shown that TiN and Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> are superior to gold not only in terms of integrated absorption power, but also in terms of size-independent conversion efficiency, achieving

IPCE > 90 % in the diameter range of 20 to 100 nm. It has been demonstrated that the efficiency of Au drops sharply when the optimal size is deviated due to the dominant scattering losses. The discovered size-independence of TiN and Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> eliminates the main technological barrier inherent in noble metals and highlights these cheap and thermally stable compounds as a promising basis for next-generation scalable photothermal systems.

В последние годы интерес к масштабируемым материалам для фототермического преобразования солнечного света значительно возрос в связи с задачами децентрализованной энергетики, опреснения воды, промышленного нагрева и экологического катализа. Разработка новых материалов с высоким коэффициентом преобразования солнечного излучения в тепло становится ключевым условием для эффективной реализации этих технологий, особенно в области устойчивой энергетики.

В данной работе проведено сравнительное теоретическое моделирование наночастиц Au, TiN и Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, а также введён новый критерий – интегральная фототермическая эффективность (IPCE), позволяющий объективно оценивать тепловой отклик во всём солнечном спектре (AM1.5G) с учётом потерь на рассеяние. Выявлено, что TiN и Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> не только превосходят Au по интегральной эффективности, но и демонстрируют выраженную размеронезависимость фототермического эффекта. Расчёты выполнялись для наночастиц радиусом 20 - 100 нм (шаг 10 нм) в воде ( $n \approx 1.33$ ) в диапазоне 400 - 900 нм с шагом 1 нм. Основной вывод: IPCE у TiN и Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> остаётся исключительно высоким (> 90 %) и практически не зависит от размера в рассмотренном диапазоне.

Тогда как эффективность Au определяется резонансом LSPR и резко снижается при отклонении от оптимального размера (60 - 70 нм) из-за роста потерь на рассеяние, широкополосный фототермический отклик TiN и Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> обусловлен их электронной структурой и высокой проводимостью, что обеспечивает стабильность IPCE при изменении размеров частиц. Это открывает перспективы для создания масштабируемых фототермических систем с минимальными ограничениями по технологическим допускам.

Критерий IPCE строго демонстрирует, что широкополосные материалы TiN и Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> MXene представляют собой эффективную альтернативу благородным металлам, обеспечивая высокую (IPCE > 90 %) и, что важно, стабильную эффективность преобразования в широком диапазоне размеров. Это свойство, в сочетании с их термической стабильностью и экономической доступностью, снижает ключевые барьеры масштабирования и открывает путь к созданию фототермических систем, способных к эффективной утилизации солнечного спектра.

Е.Н. МУРАТОВА, А.И. МАКСИМОВ, А.А. РЯБКО<sup>1</sup>,  
А.Ю. ГАГАРИНА, И.А. ВРУБЛЕВСКИЙ<sup>2</sup>, А.Н. АЛЕШИН<sup>1</sup>,  
В.А. МОШНИКОВ

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*

<sup>1</sup>*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург*

<sup>2</sup>*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
Минск*

## **АРХИТЕКТОНИКА СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ДОПИРОВАННЫХ ПЕРОВСКИТНЫХ ЯЧЕЕК**

Рассмотрены вопросы развития наноархитектоники солнечных элементов (СЭ) на основе допированных перовскитных ячеек. В работе использованы особые методики АСМ для контроля фрактальности поверхности исследуемых слоёв, обладающих деградационной устойчивостью за счёт замедления диффузионных процессов. Представлены результаты моделирования СЭ и характеристики полученного прототипа.

E.N. MURATOVA, A.I. MAKSIMOV, A.A. RYABKO<sup>1</sup>,  
A.Yu. GAGARINA, I.A. VRUBLEVSKY<sup>2</sup>, A.N. ALESHIN<sup>1</sup>,  
V.A. MOSHNIKOV

*Saint Petersburg State Electrotechnical University «LETI»*

<sup>1</sup>*Ioffe Institute of the RAS, Saint Petersburg*

<sup>2</sup>*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk*

## **ARCHITECTONICS OF SOLAR CELLS BASED ON DOPED PEROVSKITE CELLS**

The issues of development of solar cells (SC) nanoarchitectonics based on doped perovskite cells are considered. In the work, special AFM methods are used to control the fractality of the surface of the studied layers. These layers have degradation resistance due to the slowdown of diffusion processes. The results of the SC modeling and the characteristics of the obtained prototype are presented.

Перовскитные солнечные элементы (ПСЭ) играют большую роль в развитии альтернативной энергетики. Их фотоэлектрические характеристики зависят от электрической проводимости и подвижности носителей заряда. Поэтому при разработке новых материалов на основе гибридных галогенидных перовскитов важны исследования особенностей

миграции заряженных дефектов или ионных частиц. Введение добавок обеспечивает гибкое управление принципом толерантности Гольдшмидта и создание особой наноархитектоники поверхностных слёев.

Актуальными задачами являются вопросы сочетания материалов в солнечной ячейке, основными составляющими которой являются активный и транспортные слои. В работе исследуются активные перовскитные слои (как с неорганическими и органическими катионами (Cs и MA, FA) [1, 2]), транспортные слои *n*- ( $\text{TiO}_2$ ) [3] и *p*-типов (PEDOT:PSS и Spiro-OMeTAD) [4] и элементы прозрачных проводящих электродов.

Задачи уменьшения деградации приводят к новым приемам дизайна активного и транспортных слоёв. При определённых условиях синтеза формируются структуры с иерархическим строением, которые обладают более высокими значениями энергии активации диффузионных процессов, а значит меньше подвергаются деградации. Образование фрактальной поверхности сопровождается изменением электрофизических свойств. Результаты, представленные в [3], показали, что элементы фрактальной структуры на границе затрудняют диффузию ионов и тем самым потенциально повышают стабильность материала.

Результаты моделирования ПСЭ при выбранных параметрах показали, что структура на основе  $\text{MAPbI}_3$  с использованием Spiro-OMeTAD в качестве ДТС демонстрирует эффективность  $\eta \sim 25,28\%$ . Исследования ВАХ и оптических свойств ПСЭ показали, что введение специальных добавок приводит к увеличению проводимости в видимом спектральном диапазоне [2] и увеличению эффективности ячеек [4]. Получение плёнок с фрактальной структурой сопровождается изменением электрофизических свойств, что даёт возможность использовать такой материал в качестве электронного транспортного слоя в ПСЭ [5]. Таким образом, на основе проведённых исследований определены направления развития технологических приёмов по повышению эффективности преобразования энергии солнечных элементов на основе перовскитных ячеек.

#### *Литература*

1. Muratova E.N., Moshnikov V.A., Aleshin A.N., et.al. // Glass Physics and Chemistry. 2023. V. 49. No. 6. P. 672-679.
2. Nenashev G.V., Aleshin A.N., Ryabko A.A., et.al. // Solid State Communications. 2024. V. 388. P. 115554.
3. Гагарина А.Ю., Безверхний В.П., Муратова Е.Н. и др. // Физика и техника полупроводников, 2024. Т. 58. № 11. С. 591-593.
4. Spivak Y., Muratova E., Moshnikov V., et.al. // Materials. 2022. V. 15 (3). P. 990.
5. Moshnikov V.A.; Muratova E.N., Vrublevsky I.A., et.al. // Materials. 2025. V. 18. P. 3977.

Д.А. СОКОЛОВА, О.А. ПОДСВИРОВ, А.Е. ИЕШКИН<sup>1</sup>,  
А.А. ТАТАРИНЦЕВ<sup>1</sup>, А.И. ЛИХАЧЕВ<sup>2</sup>, А.В. НАЩЕКИН<sup>2</sup>,  
А.В. МЯСОЕДОВ<sup>2</sup>

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

<sup>1</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

<sup>2</sup>*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург*

## **ФОРМИРОВАНИЕ СЛОЯ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА В ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ОБЛАСТИ СИЛИКАТНОГО СТЕКЛА С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ**

Приведены результаты экспериментов по формированию слоя наночастиц серебра в приповерхностной области силикатного стекла с помощью облучения электронами системы «стекло – тонкая плёнка серебра». Впервые было показано, что для формирования наночастиц возможно использовать электронное облучение без дополнительной термообработки. Также был определён механизм формирования слоистой структуры распределения концентрации наночастиц по образованному слою.

D.A. SOKOLOVA, O.A. PODSVIROV, A.E. IESHKIN<sup>1</sup>,  
A.A. TATARINTSEV<sup>1</sup>, A.I. LIHACHEV<sup>2</sup>, A.V. NASHCHEKIN<sup>2</sup>,  
A.V. MYASOEDOV<sup>2</sup>

*Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University*

<sup>1</sup>*Lomonosov Moscow State University*

<sup>2</sup>*Ioffe Institute of the RAS, Saint Petersburg*

## **FORMATION OF A LAYER OF SILVER NANOPARTICLES IN THE NEAR-SURFACE REGION OF SILICATE GLASS USING ELECTRON IRRADIATION**

The results of experiments on the formation of a silver nanoparticle layer in the near-surface region of silicate glass using electron irradiation of a glass-silver thin film system are presented. It was demonstrated for the first time that electron irradiation can be used to form nanoparticles without additional heat treatment. The reasons for the formation of a layered structure of nanoparticle concentration distribution across the resulting layer were also determined.

Плазмонные и нелинейные свойства материалов с наночастицами (НЧ), например, силикатные стёкла с НЧ серебра, делают такие материалы перспективными для фотоники. Они позволяют управлять светом на

наномасштабе – усиливать, концентрировать, преобразовывать и направлять его. Это открывает путь к созданию устройств следующего поколения, более быстрых, компактных и эффективных, чем традиционная оптика [1 - 3].

Цель работы – экспериментальное исследование влияния параметров электронного облучения (ЭО) на формирование НЧ Ag в стёклах покрытых тонкой плёнкой серебра толщиной  $\sim 30$  нм, а также объяснение механизма формирования наблюдаемой слоистой структуры.

ЭО проводилось на оже-спектрометре Varian с энергией электронов  $E = 20$  кэВ. Плотность электронного тока  $j = 300 - 1600$   $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , доза  $Q = 50, 100$  мКл/ $\text{cm}^2$ . ЭО проводилось при комнатной температуре.

На рис. 1 показано, что после ЭО с плотностью тока  $j = 300$   $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  интенсивность поглощения увеличивается за счёт формирования молекулярных кластеров Ag [4] в приповерхностных слоях стекла. При ЭО с  $j = 1600$   $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  появляется полоса поглощения с максимумом около 400 нм, что соответствует плазмонному резонансу НЧ Ag. На рис. 2 приведено ПЭМ-изображение распределения НЧ Ag по глубине слоя, где видно: толщина слоя с НЧ составляет около 1.2 мкм; концентрация НЧ неоднородна по всему слою; размеры НЧ варьируются в диапазоне 2 - 10 нм. В работе предложен механизм формирования выше описанной слоистой структуры, основанный на возникновении экстремально высоких значений поля.

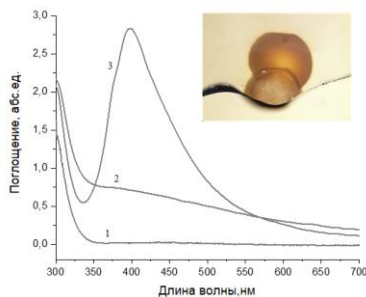


Рис. 1. Спектры поглощения после ЭО с  $Q = 100$  мКл/ $\text{cm}^2$  при различных  $j$ : до облучения (1); 300 мкА/ $\text{cm}^2$  (2); 1600 мкА/ $\text{cm}^2$  (3)

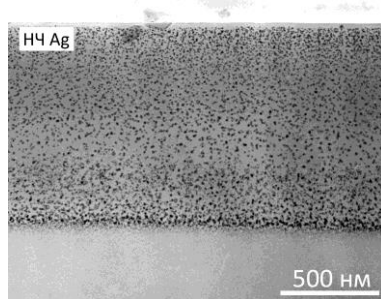


Рис. 2. ПЭМ-изображение поперечного сечения образца, облученного при  $Q = 100$  мКл/ $\text{cm}^2$ ,  $j = 1600$  мкА/ $\text{cm}^2$

#### Список литературы

1. Zheludev N.I. // Science. 2010. V. 328. P. 582-583.
2. Ozbay E. // Science. 2006. V. 311. P. 189-193.
3. Talapin D.V., et al. // Chemical Reviews. 2010. V. 110. P. 389-458.
4. Félix C., et al. // Chemical Physics Letters. 1999. V. 313. P. 105.

Д.Д. УРМУРЗИН, А.А. БОБКОВ

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*

## **АНАЛИЗ ПЛАЗМОННЫХ СВОЙСТВ СПЕЧЁННЫХ СЕРЕБРЯНЫХ СТРУКТУР НА ФРАКТАЛЬНЫХ ТРЕКАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ МЕТОДОМ СОВМЕЩЁННОЙ АСМ РАМАНОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ**

Разработан метод формирования SERS-подложек с управляемыми свойствами на основе фрактальных микро- и наноструктур в тонких плёнках серебра на подложках ИТО, создаваемых контролируемым электрическим разрядом. В качестве исследования плёнок был использован комплексный анализ методами АСМ и Раман. Метод позволяет создавать высокоэффективные и воспроизводимые платформы для высокочувствительной биохимической сенсорики, молекулярной диагностики и нанофотонных приложений.

D.D. URMURZIN, A.A. BOBKOV

*Saint Petersburg State Electrotechnical University «LETI»*

## **ANALYSIS OF PLASMONIC PROPERTIES OF SINTERED SILVER STRUCTURES ON FRACTAL TRACKS OF ELECTRICAL BREAKDOWN USING COMBINED AFM-RAMAN SPECTROSCOPY**

A method for forming SERS substrates with controlled properties based on fractal micro- and nanostructures in thin silver films on ITO substrates created by controlled electrical discharge was developed. The films were studied using comprehensive AFM and Raman analysis. This method enables the creation of highly efficient and reproducible platforms for highly sensitive biochemical sensing, molecular diagnostics, and nanophotonic applications.

Формирование фрактальных микро- и наноструктур, в том числе дендритных наночастиц, представляет одну из актуальных задач современного материаловедения, нанофотоники и оптической спектроскопии. Фрактальные структуры характеризуются высокоразвитой поверхностью с уникальными адсорбционными и каталитическими свойствами, что открывает новые возможности в разработке приборов оптоэлектроники, газовых сенсоров нового поколения, каталитических носителей и структур биомедицинского назначения [1].

Размеры золотых и серебряных наночастиц, их форма и порядок-беспорядок размещения существенно влияют на эффективность гигантского комбинационного рассеяния (SERS). Однако значительный пробел существует в исследовании дендритных наночастиц серебра. В данной работе исследованы такие объекты с использованием совмещённых методов АСМ и рамановской спектроскопии [2, 3] Использование наночастиц серебра при внедрении в пористый кремний и анализ методом рамановской спектроскопии и мультифотонной микроскопии проводится в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» уже в течение ряда лет [4 - 7]. Сенсоры на SERS-подложках являются мощным аналитическим методом для изучения молекулярной структуры и идентификации веществ. Использование фрактальных треков электрического пробоя для формирования «горячих точек» (plasmonic hotspots) с сильно сконцентрированным электромагнитным полем представляется перспективным.

Настоящее исследование представляет собой комплексный подход к созданию высокоактивных SERS-субстратов на основе гибридных плазмонно-фрактальных дендритных наноструктур. Комплексный анализ, включающий атомно-силовую микроскопию, картирование SERS, мультифотонную микроскопию и теоретическое моделирование, обеспечивает глубокое понимание механизмов плазмонного усиления в дендритных структурах и открывает путь к их практическому применению.

Работа проводилась в Центре СЗМ СПбГЭТУ «ЛЭТИ» [8].

#### *Список литературы*

1. Максимов А. И. и др. Основы золь-гель-технологии нанокompозитов. 2008.
2. Мошников В.А., Спивак Ю.М. Атомно-силовая микроскопия для нанотехнологии и диагностики. 2009.
3. Бобков А.А. и др. Основы атомно-силовой микроскопии. 2024.
4. Korepanov O.A., et al. New diagnostic techniques for incorporated porous materials // 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). – IEEE, 2022. P. 975-977.
5. Lemesko P.S., et al. Multiphoton Microscopy of Ag/por-Si Composite // 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). IEEE, 2022. P. 982-985.
6. Spivak Y.M., et al. One-step electrochemical synthesis of Ag/por-Si composite from monocrystalline Si // Journal of Physics: Conference Series. 2020. V. 1697. No. 1. P. 012126.
7. Smerdov R.S., et al. The characterisation of nanostructured porous silicon/silver layers via Raman spectroscopy // Journal of Physics: Conference Series. 2018. V. 1038. No. 1. P. 012064.
8. Мошников В.А. и др. Объединенный центр сканирующей зондовой микроскопии ООО «Нова СПб»–СПбГЭТУ «ЛЭТИ» в области радиоэлектроники – центр нового типа для решения приоритетных задач. 2024.



Е.Р. БУРМИСТРОВ, Л.П. АВАКЯНЦ

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

## **МАСШТАБИРОВАНИЕ ЭНЕРГИИ В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ: ОПТИМИЗАЦИЯ ПУТЁМ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРИОДОМ ЗАТВОРА**

На основании экспериментального исследования плазмонного детектирования терагерцового (ТГц) излучения в светодиодных гетероструктурах  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  с множественными квантовыми ямами демонстрируется возможность управления энергетическими характеристиками ТГц-излучения за счёт изменения периода решетчатого затвора. Установлено, что уменьшение периода затвора с 1.6 до 1.0 мкм приводит к синему смещению фундаментальной плазмонной моды. Резонансные частоты смещаются на 1.1 ТГц, что соответствует увеличению энергии кванта излучения. Данное явление открывает новые возможности в области управления энергией импульсного ТГц-излучения.

E.R. BURMISTROV, L.P. AVAKYANTS

*Lomonosov Moscow State University*

## **ENERGY SCALING IN THE TERAHERTZ RANGE. OPTIMIZATION BY CONTROLLING THE GRATING GATE PERIOD**

Based on an experimental study of plasmon detection of terahertz (THz) radiation in  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  LED heterostructures with multiple quantum wells the possibility of controlling the energy characteristics of THz radiation by changing the period of the lattice gate is demonstrated. It is established that a decrease in the shutter period from 1.6 to 1.0 microns leads to a blue shift of the fundamental plasmon mode. The resonant frequencies are shifted by 1.1 THz which corresponds to an increase in the energy of the radiation quantum. This phenomenon opens up new possibilities in the field of energy management of pulsed THz radiation.

Терагерцовый (ТГц) диапазон остается одним из наиболее перспективных, но и наиболее сложных для генерации и детектирования излучения. Ключевой задачей является создание компактных, эффективных и перестраиваемых источников ТГц-излучения. Одним из путей решения этой проблемы является использование плазмонных эффектов в двумерных (2Д) электронных системах [1].

Целью работы является исследование зависимости энергетических характеристик ТГц-излучения от геометрических параметров решетчатых

затворов, выращенных на гетероструктурах  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  с множественными квантовыми ямами (МКЯ) и оптимизация этих параметров для управления выходной мощностью и частотой излучения.

Исследования проводились на гетероструктурах  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  с МКЯ, выращенных методом газовой фазной эпитаксии. На поверхности структур формировались решетчатые затворы из  $\text{Ti}/\text{Au}$  с периодами 1.6 и 1.0 мкм. Для генерации и детектирования ТГц-излучения использовалась методика терагерцевой спектроскопии с временным разрешением (THz-TDS) с использованием фотопроводящих антенн на основе сверхрешёточных гетероструктур  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  [2].

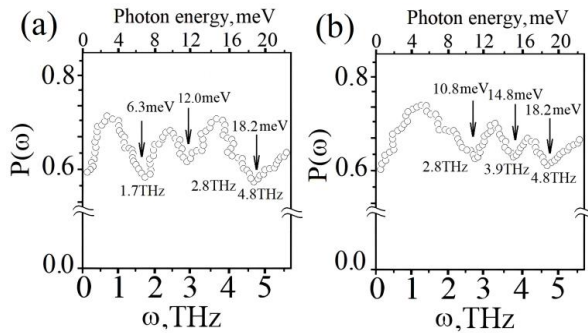


Рис. 1. Частотные спектры мощности ТГц-излучения гетероструктур с периодом затвора 1.6 мкм (а) и 1.0 мкм (б)

Наблюдаемое синее смещение плазмонной моды объясняется изменением волнового вектора плазмона. Уменьшение периода затвора приводит к увеличению волнового вектора 2Д-плазмона, что вызывает рост резонансной частоты

#### Список литературы

1. Бурмистров Е.Р., Авакянц Л.П. // ЖЭТФ. 2025. Т. 167 (5). С. 720.
2. Бурмистров Е.Р., Авакянц Л.П. и др. // Оптика и спектроскопия. 2025. Т. 133 (9). С. 986.

Т.А. ДИК<sup>1,2</sup>, И.А. НИКОЛАЕВА<sup>1,3</sup>, Д.Е. ШИПИЛО<sup>1,3</sup>,  
Г.Э. РИЗАЕВ<sup>1,3</sup>, А.В. КОРИБУТ<sup>1,2</sup>, Н.А. ПАНОВ<sup>1,3</sup>,  
Н.Р. ВРУБЛЕВСКАЯ<sup>1,3</sup>, М.В. ЛЕВУСЬ<sup>1,3</sup>,  
Л.В. СЕЛЕЗНЕВ<sup>1,3</sup>, О.Г. КОСАРЕВА<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

<sup>2</sup>*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный*

<sup>3</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

## **ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАЦИИ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ ПРИ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ФИЛАМЕНТАЦИИ В ВОЗДУХЕ В УСЛОВИЯХ СЛАБОЙ ФОКУСИРОВКИ**

Произведено экспериментальное и численное исследование процесса генерации второй гармоники в атмосферном воздухе при филаментации лазерных импульсов ближнего ИК-диапазона. Показано отсутствие радиальной симметрии в пространственном распределении второй гармоники. Изучено влияние энергии и поляризации лазерного импульса на энергию второй гармоники, в том числе при пониженном давлении среды.

T.A. DICK<sup>1,2</sup>, I.A. NIKOLAEVA<sup>1,3</sup>, D.E. SHIPILO<sup>1,3</sup>, G.E. RIZAEV<sup>1,3</sup>,  
A.V. KORIBUT<sup>1,2</sup>, N.A. PANOV<sup>1,3</sup>, N.R. VRUBLEVSKAYA<sup>1,3</sup>,  
M.V. LEVUS<sup>1,3</sup>, L.V. SELEZNEV<sup>1,3</sup>, O.G. KOSAREVA<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

<sup>2</sup>*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny*

<sup>3</sup>*Lomonosov Moscow State University*

## **FEATURES OF SECOND HARMONIC GENERATION DURING FEMTOSECOND FILAMENTATION IN AIR UNDER LOOSE FOCUSING CONDITIONS**

An experimental and numerical study of second-harmonic generation in atmospheric air during filamentation of near-IR femtosecond laser pulses has been carried out. A pronounced asymmetry in the spatial distribution of the second-harmonic radiation is demonstrated. The influence of the laser pulse energy and polarization on the second-harmonic yield is investigated, including under conditions of reduced ambient pressure.

Филаментация лазерных импульсов сопровождается образованием протяженных плазменных каналов [1]. В изотропных средах в первом приближении генерация второй гармоники запрещена, однако при

взаимодействии электронов плазмы с высокоинтенсивным излучением начинает играть роль выделенное направление в среде, связанное с поляризацией лазерного импульса, в этом случае возможна генерация второй гармоники, в том числе в атмосферном воздухе.

Эксперименты проводились на титан-сапфировой лазерной системе с центральной длиной волны 940 нм, длительностью импульса около 100 фс и энергией до 10 мДж. Лазерный пучок фокусировался линзой. Числовая апертура пучка варьировалась от 0,005 до 0,06. Вблизи области фокуса образовывалась плазма и происходила генерация второй гармоники. Для выделения второй гармоники применялись дихроичные зеркала и спектральные фильтры. Спектр второй гармоники при различных энергиях лазерного импульса показан на рис. 1. Как видно из рис. 1б, при значительной энергии импульса на спектре видно высокочастотное крыло суперконтинуума. Тем не менее на спектре отчётливо виден спектр второй гармоники. На рис. 2 показано пространственное распределение излучения второй гармоники, зарегистрированное с помощью ПЗС матрицы. Это распределение имеет два ярко-выраженных максимума, лежащих в плоскости поляризации лазерного излучения.

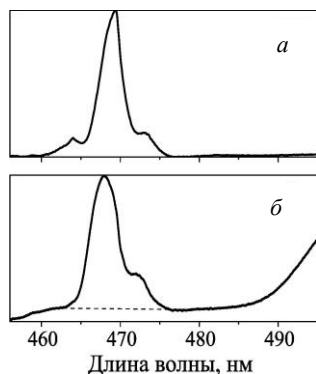


Рис. 1. Спектр второй гармоники при энергии импульса первой гармоники 1 мДж (а) и 6 мДж (б)

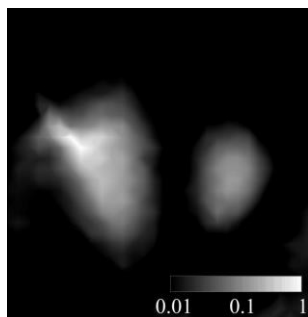


Рис. 2. Пространственное распределение излучения второй гармоники

Экспериментально и численно были произведены оценки энергии выхода второй гармоники, которые показали, что коэффициент преобразования может достигать  $10^{-9}$ .

#### Список литературы

1. Couairon A., Mysyrowicz A. // Phys. rep. 2007. V. 441 (2-4). P. 47-189.

А.С. МАРАКУЛИН<sup>1</sup>, М.И. ПАУКОВ<sup>1</sup>, Д.И. ЯКУБОВСКИЙ<sup>1</sup>,  
М.Г. БУРДАНОВА<sup>1,2</sup>, А.В. АРСЕНИН<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный*

<sup>2</sup>*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

<sup>3</sup>*Исследовательский центр новых технологий XPACEO, Дубай, ОАЭ*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УЛЬТРАТОНКИХ ЗОЛОТЫХ ПЛЁНОК В ШИРОКОМ СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ**

Методами терагерцовой спектроскопии и спектрофотометрии исследованы оптические характеристики ультратонких золотых плёнок с различной морфологией – сплошные и островковые структуры толщиной 3, 5 и 8 нм. Установлено влияние морфологии и толщины плёнок на их оптические постоянные в широком спектральном диапазоне.

A.S. MARAKULIN<sup>1</sup>, M.I. PAUKOV<sup>1</sup>, D.I. YAKUBOVSKY<sup>1</sup>,  
M.G. BURDANOVA<sup>1,2</sup>, A.V. ARSENIN<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny*

<sup>2</sup>*Prokhorov Institute of General Physics RAS, Moscow*

<sup>3</sup>*Emerging Technologies Research Center XPACEO, Dubai, UAE*

## **INVESTIGATION OF OPTICAL PROPERTIES OF ULTRATHIN GOLD FILMS IN A WIDE SPECTRAL RANGE**

The optical characteristics of ultrathin gold films with different morphology – continuous and island structures with thicknesses of 3, 5 and 8 nm – were studied by terahertz spectroscopy and spectrophotometry. The influence of morphology and film thickness on their optical constants in a broad spectral range has been established.

Ультратонкие металлические плёнки толщиной менее 10 нм представляют значительный интерес для современной оптоэлектроники и фотоники благодаря уникальным оптическим свойствам [1]. Особый интерес представляет исследование плёнок с различной морфологией – как сплошные, так и островковые структуры, поскольку их оптический отклик существенно различается [2]. Комплексное изучение таких систем в широком спектральном диапазоне позволяет установить взаимосвязь между морфологией и функциональными характеристиками.

В работе представлены результаты исследования серии золотых плёнок толщиной 3, 5 и 8 нм с различной морфологией. Методом

сканирующей электронной микроскопии подтверждено формирование как сплошных, так и островковых структур в зависимости от условий осаждения (рис. 1). Для характеристики оптических свойств использовались терагерцовая спектроскопия и спектрофотометрия в видимом и ближнем ИК-диапазонах. Экспериментально показано, что морфология плёнок существенно влияет на их оптические характеристики (рис. 2). Результаты терагерцовой спектроскопии выявили различия в электротранспортных свойствах плёнок с разной морфологией, что проявляется в изменении комплексной проводимости.

Полученные результаты демонстрируют возможность управления оптическими свойствами ультратонких металлических плёнок за счёт контроля их морфологии, что открывает перспективы для создания функциональных материалов для оптоэлектронных устройств.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 24-72-10039).

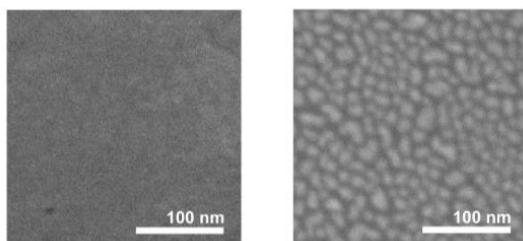


Рис. 1. СЭМ-изображения сплошной (слева) и островковой (справа) золотых плёнок толщиной 3 нм

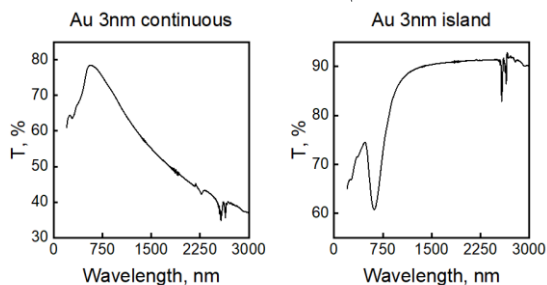


Рис. 2. Спектры пропускания сплошной и островковой плёнок толщиной 3 нм

#### Список литературы

1. Yun J. // Adv. Funct. Mater. 2017. V. 27. P. 1606641.
2. Yakubovsky D.I., Stebunov Yu.V., et. al. // Adv. Mater. Interfaces. 2019. P. 190019.

**В.Д. САМЫШКИН, А.В. ОСИПОВ, А.С. АБРАМОВ,  
А.А. КУЗНЕЦОВ, Д.А. БОДУНОВ, А.О. КУЧЕРИК**

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

## **ОПТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИНЕЙНЫХ УГЛЕРОДНЫХ ЦЕПЕЙ, ОСАЖДЁННЫХ В ВИДЕ КВАЗИУПОРЯДОЧЕННЫХ ПЛЁНОК**

Проведены исследования оптоэлектрических свойств линейных углеродных цепей, осаждённых в виде квазиупорядоченных плёнок. Предложен механизм лазерного получения цепей различной длины и их локализации в пространстве. Проведены исследования оптических и оптоэлектрических свойств плёнок, полученных эжекционным распылением коллоидных систем, как на твёрдую подложку, так и в пористую среду. Результаты экспериментов и моделирования показывают перспективные оптоэлектрические характеристики структур.

**V.D. SAMYSHKIN, A.V. OSIPOV, A.S. ABRAMOV,  
A.A. KUZNETSOV, D.A. BODUNOV, A.O. KUCHERIK**

*Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs*

## **OPTOELECTRIC PROPERTIES LINEAR CARBON CHAINS DEPOSITED AS QUASI-ORDERED FILMS**

The optoelectric properties of linear carbon chains deposited as quasi-ordered films have been studied. A mechanism for laser production of circuits of various lengths and their localization in space is proposed. The optical and optoelectric properties of films obtained by ejection spraying of colloidal systems onto both a solid substrate and a porous medium have been studied. The results of experiments and simulations show promising optoelectric characteristics of the structures.

Данная работа посвящена вопросам исследования оптоэлектрических свойств линейных углеродных цепей, осаждённых в виде квазиупорядоченных плёнок. Учитывая сложности синтеза, последующей стабилизации в фазе *sr*-гибридизации, данная форма исследована крайне мало. В процессе исследования был предложен способ создания коллоидных систем содержащих устойчивые структуры линейного цепочечного углерода, стабилизированного наночастицами золота, полученных из раствора  $\text{HAuCl}_4$  [1]. Для изучения оптических свойств, полученные углеродные цепи были осаждены на поверхность подложки с использованием метода пространственной ориентации в присутствии

электрического поля, что позволяло управлять направлением осаждения цепей [2] (рис. 1). Были исследованы фотоиндуцированные эффекты полученных тонких плёнок линейного углерода, полученных в результате осаждения [3] с использованием атомно-силового микроскопа, работающего в режиме измерения туннельного тока (рис. 2). В качестве внешнего источника накачки использовалось лазерное излучение с длиной волны 532 нм. Измеренные вольт-амперные характеристики (ВАХ) демонстрировали полупроводниковый характер исследуемого материала с шириной запрещённой зоны в диапазоне от -1 до 1 эВ. На основе полученных результатов, были проведены исследования по применимости таких материалов в создании фотоэлементов [4]. Разработанный способ создания микросвитков на основе тонких плёнок диоксида титана, позволил продемонстрировать, как стабилизированный линейный углерод, интегрированный в его матрицу, влияет на оптофизические свойства материала. Особенно выделяются системы, легированные металлоуглеродными комплексами, стабилизированными золотыми наночастицами, демонстрирующие квантовую эффективность до 46 %.

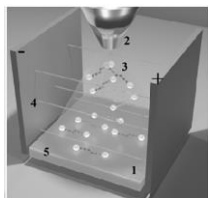


Рис. 1. Схема экспериментальной установки по осаждению углеродных цепей

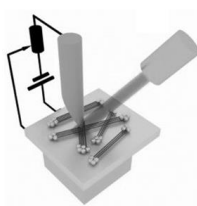


Рис. 2. Схема исследования фотоиндуцированной проводимости

#### Список литературы

1. Kavokina S., et al. Laser fabrication of gold-sp-carbon films // Condensed Matter. 2023. V. 8. No. 4. P. 96.
2. Kutrovskaya S., et al. Electric field assisted alignment of monoatomic carbon chains // Scientific Reports. 2020. V. 10. No. 1. P. 9709.
3. Samyshkin V., et al. Photosensitive free-standing ultra-thin carbyne-gold films // Optical and Quantum Electronics. 2019. V. 51. No. 12. P. 394.
4. Бухаров Д.Н. и др. Электрофизические свойства микросвитков диоксида титана, легированных линейными углеродными цепями, стабилизированными золотыми наночастицами // Оптика и спектроскопия. 2024. Т. 132. № 10. С. 1043-1050.



К.А. СМІРНОВ, И.О. БАТУЕВ, А.И. МАЙДЫКОВСКИЙ,  
Т.В. МУРЗИНА

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

## **ОПТИЧЕСКИЕ НЕЛИНЕЙНЫЕ И РЕЗОНАТОРНЫЕ СВОЙСТВА МИКРОКРИСТАЛЛОВ ПЕРИЛЕНА**

Исследованы резонаторные и нелинейно-оптические свойства микрокристаллов перилена в спектральном диапазоне 700 - 1000 нм. Определены спектральные зависимости коэффициентов нелинейного поглощения и рефракции, а также нелинейной восприимчивости третьего порядка. Спектры двухфотонной фотолюминесценции показали возбуждение в таких кристаллах резонаторных мод типа квази-шепчущей галереи, что подтверждено численным FDTD-моделированием. Рассмотрена возможность управления этими модами за счёт лазерно-индуцированной модуляции показателя преломления микрокристалла.

K.A. SMIRNOV, I.O. BATUEV, A.I. MAYDYKOVSKY,  
T.V. MURZINA

*Lomonosov Moscow State University*

## **OPTICAL NONLINEAR AND RESONANT PROPERTIES OF PERYLENE MICROCRYSTALS**

The resonator and nonlinear optical properties of perylene microcrystals were studied in the spectral range of 700 - 1000 nm. Spectral dependences of the nonlinear absorption and refraction coefficients, as well as third-order nonlinear susceptibility, were determined. Two-photon photoluminescence spectra revealed the excitation of quasi-whispering gallery resonator modes in these crystals, as confirmed by numerical FDTD simulations. The possibility of controlling these modes through laser-induced modulation of the microcrystal's refractive index was explored.

Методы самоорганизации, в частности сублимация из газообразной фазы, предлагают простой и эффективный способ получения высококачественных кристаллических микроструктур из органических материалов. Такие структуры сочетают в себе дальний молекулярный порядок, низкую плотность дефектов и настраиваемые оптоэлектронные свойства, что делает их перспективными для создания активных и пассивных элементов микрофотоники [1, 2]. Органические полупроводниковые красители, такие как перилен ( $C_{20}H_{12}$ ), являются особенно привлекательными материалами благодаря их термической и механической стабильности, высокому квантовому выходу

люминесценции и выраженной нелинейности [3, 4]. Ранее было показано, что в процессе самоорганизации возможно формирование микрокристаллов перилена в виде прямоугольных параллелепипедов ( $\alpha$ -фаза), образующих резонаторы, поддерживающие моды Фабри–Перо и/или квази-шепчущей галереи, что открывает перспективы создания на их основе микролазеров и сенсоров [5].

В рамках исследования обнаружена и проанализирована модовая структура в спектрах двухфотонно-возбуждаемой фотolumинесценции (ДФЛ) микрокристаллов перилена (длина стороны 3 - 10 мкм). Показано, что в спектрах ДФЛ (рис. 1) микрокристаллов перилена с латеральным размером до 6 мкм наблюдаются резонаторные моды типа квази-шепчущей галереи с добротностью до 300, что подтверждается численным моделированием (рис. 2). Эффекты нелинейной рефракции и поглощения изучены методом Z-сканирования. Обнаружено, что коэффициенты нелинейной рефракции и поглощения слабо изменяются в диапазоне длин волн 700 - 1000 нм и составляют  $10^{-15}$  м<sup>2</sup>/Вт и  $10^3$  см/ГВт, соответственно. Изучена возможность управления спектральным положением резонансных мод за счёт оптически индуцированной модуляции показателя преломления, в том числе при воздействии на структуру фемтосекундного излучения с пиковой интенсивностью импульса до  $10^{14}$  Вт/м<sup>2</sup>. Отсутствие влияния нелинейной рефракции на спектральное положение резонаторных мод позволяет сделать вывод о быстром типе керровской нелинейности в перилене.

Работа выполнена при поддержке РНФ № 24-42-02009.

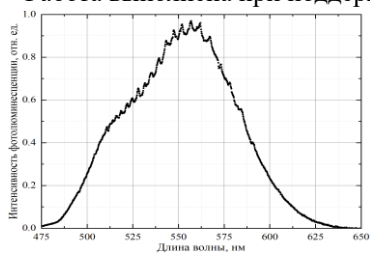


Рис. 1. Спектр фотolumинесценции микрокристалла перилена с резонаторной структурой

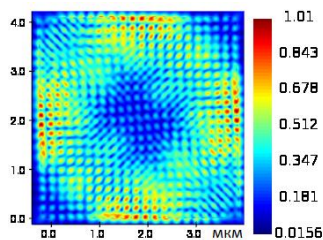


Рис. 2. Результат моделирования распределения электрического поля в плоскости кристалла

#### Список литературы

1. Zhao X., et al. // Advanced Science. 2023. V. 10 (15). P. 2300483.
2. Zhang X. et al. // Advanced Materials. 2018. V. 30 (44) P. 1801048.
3. Samad F.A., et al. // J. of Molecular Liquids. 2025. V. 418. P. 126679.
4. Tanaka J. // Bulletin of the Chemical Society of Japan. 1963. V. 36 (10). P. 1237-1249.
5. Pradeep V. V., et al. // Advanced Optical Materials. 2020. V. 8 (1). P. 1901317.

П.А. ШУЛЫНДИН, Б.В. РУМЯНЦЕВ, А.В. ПУШКИН,  
Е.А. МИГАЛЬ, Ф.В. ПОТЁМКИН

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

**РАСШИРЕНИЕ СПЕКТРА ГАРМОНИК ВЫСОКОГО  
ПОРЯДКА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ДВУХЦВЕТНОГО  
ИНТЕНСИВНОГО ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ БЛИЖНЕГО И СРЕДНЕГО ИК-ДИАПАЗОНОВ  
НА ГАЗОВУЮ СРЕДУ**

В рамках данной работы экспериментально продемонстрировано расширение спектра гармоник высокого порядка (ГВП) вплоть до  $\sim 110$  эВ при генерации в аргоне и до  $\sim 200$  эВ в гелии при добавлении интенсивного длинноволнового излучения среднего ИК-диапазона ( $4.5 \text{ мкм}$ ,  $\sim 10^{12} \text{ Вт/см}^2$ ) к основному излучению ближнего ИК-диапазона ( $1.24 \text{ мкм}$ ,  $\sim 10^{14} \text{ Вт/см}^2$ ). Установлено, что расширение спектра ГВП в высокочастотную область с сохранением высокой эффективности генерации обусловлено увеличением кинетической энергии электрона на траектории второго возврата, а уменьшение вероятности рекомбинации компенсируется повышением вероятности ионизации в двухцветном поле.

P.A. SHULYNDIN, B.V. RUMIANTSEV, A.V. PUSHKIN,  
E.A. MIGAL, F.V. POTEMKIN

*Lomonosov Moscow State University*

**HIGH-ORDER HARMONIC SPECTRUM EXTENSION DRIVEN  
BY THE TWO-COLOR INTENSE FEMTOSECOND LASER  
FIELD OF THE NEAR-IR AND MID-IR REGIONS  
IN GASEOUS MEDIUM**

In this work, we experimentally demonstrate the extension of the high-order harmonic spectrum up to  $\sim 110 \text{ eV}$  in argon and  $\sim 200 \text{ eV}$  in helium. This spectral extension was achieved through the introduction of an intense mid-IR field ( $4.5 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $\sim 10^{12} \text{ W/cm}^2$ ) to the main near-IR driving field ( $1.24 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $\sim 10^{14} \text{ W/cm}^2$ ). It was found that the observed generation in the high-frequency region, while maintaining high conversion efficiency, is attributed to the increased electron kinetic energy gained during the second return trajectory. This mechanism relies on enhanced ionization probability effectively compensating for the reduced recombination probability.

Основной исследовательский интерес в области генерации гармоник высокого порядка (ГВП) в газах связан с возможностью расширения

спектра генерируемого излучения в сторону более высоких энергий фотонов для целей время-разрешённой спектроскопии в экстремальном ультрафиолетовом и мягком рентгеновском диапазонах [1, 2]. Одним из перспективных экспериментальных методов для этого является использование двухцветного лазерного поля, тогда второе длинноволновое поле модифицирует временную форму основного генерирующего импульса ближнего ИК-диапазона и динамику волновой функции электрона, что приводит к изменению формы и ширины спектра ГВП [3].

В настоящей работе экспериментально показано, что добавление сильно возмущающего длинноволнового поля среднего ИК-диапазона ( $4.5\text{ мкм}$ ,  $200\text{ фс}$ ,  $\sim 10^{12}\text{ Вт/см}^2$ ) к основному генерирующему излучению ближнего ИК-диапазона ( $1.24\text{ мкм}$ ,  $100\text{ фс}$ ,  $\sim 10^{14}\text{ Вт/см}^2$ ) [4] приводит к расширению спектра ГВП с  $\sim 90$  до  $\sim 110\text{ эВ}$  при генерации ГВП в аргоне (рис. 1А) и с  $\sim 170$  до  $\sim 200\text{ эВ}$  при генерации ГВП в гелии (рис. 1Б). В отличие от одноцветного воздействия, при двухцветном воздействии с использованием длинноволнового поля определяющий вклад в расширение спектра ГВП вносит эффективное ускорение электрона на траектории второго возврата. При этом сохранение высокой эффективности генерации достигается за счёт компенсации эффекта расплывания волновой функции электрона путём повышения вероятности ионизации в двухцветном поле.

Работа поддержана грантом РНФ № 25-22-00084. Оборудование, используемое в данной работе, приобретено при поддержке Программы развития МГУ им. М.В. Ломоносова и Национального проекта “Наука и университеты”. Шулыдин П.А. и Румянцев Б.В. являются стипендиатами фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

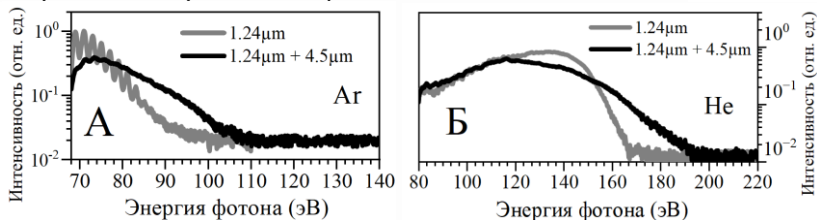


Рис. 1. Спектры ГВП, генерируемые при одноцветном воздействии  $1.24\text{ мкм}$ -поля (серые кривые) и при добавлении  $4.5\text{ мкм}$ -поля (чёрные) в аргоне (А) и гелии (Б)

#### Список литературы

1. Naranjo-Montoya O.A., et al. // Review of Scientific Instruments. 2024. V. 95. No. 10.
2. Pertot Y., et al. // Science. 2017. V. 355. No. 6322. P. 264-267.
3. Румянцев Б.В. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2025. Т. 122. № 9. С. 563-571.
4. Румянцев Б.В. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2025. Т. 121. № 5. С. 358-364.

М.В. ЛЕВУСЬ<sup>1,2</sup>, Г.Э. РИЗАЕВ<sup>1,2</sup>, Т.А. ДИК<sup>2</sup>, Л.В. СЕЛЕЗНЕВ<sup>1,2</sup>,  
Ю.Э. ГЕЙНЦ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

<sup>2</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

<sup>3</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

<sup>4</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск

## **УВЕЛИЧЕНИЕ РАССТОЯНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИНТЕНСИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА С ПОМОЩЬЮ КАСКАДА КЕРРОВСКИХ ЛИНЗ**

В работе экспериментально продемонстрировано увеличение расстояния распространения интенсивного лазерного импульса с помощью каскада стеклянных пластин.

M.V. LEVUS<sup>1,2</sup>, G.E. RIZAIEV<sup>1,2</sup>, T.A. DICK<sup>2,3</sup>, L.V. SELEZNEV<sup>1,2</sup>,  
Yu.E. GEINTS<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University

<sup>2</sup>Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

<sup>3</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

<sup>4</sup>V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the RAS, Tomsk

## **EXTENDING THE PROPAGATION DISTANCE OF AN INTENSE LASER PULSE USING A CASCADE OF KERR LENSES**

This work experimentally demonstrates the extension of the propagation distance of an intense laser pulse using a cascade of glass plates.

При распространении мощных ультракоротких лазерных импульсов в воздухе может наблюдаться филаментация. Одним из режимов распространения излучения на значительные расстояния с низкой расходимостью является пост-филаментационный канал (ПФК) [1], который может наблюдаться после области филаментации. ПФК представляет практический интерес для задач дистанционной транспортировки интенсивного лазерного излучения, в частности для управления высоковольтным разрядом. В настоящей работе экспериментально продемонстрировано увеличение дистанции распространения интенсивного ПФК с использованием каскада стеклянных пластин.

Для получения мощных ультракоротких лазерных импульсов использовался титан-сапфировый лазер с центральной длиной волны 750 нм и длительностью импульса 100 фс. После выхода из лазерной системы пучок фокусировался сферическим зеркалом, после фокуса которого образовывался ПФК. Для снижения расходимости ПФК в оптическую схему последовательно вводились пять стеклянных пластин толщиной 2 мм, расположенных на различных расстояниях от точки фокуса зеркала. Благодаря керровской нелинейности стеклянная пластина уменьшала поперечные размеры пучка. Результаты влияния каскада пластин представлены на рис. 1. Вертикальные прерывистые черные линии указывают положения установленных пластин. Эксперименты показали, что при свободном распространении диаметр пучка на расстоянии 2 м от фокуса достигал 5 мм. В то же время, при применении каскада пластин, диаметр пучка на расстоянии 6 м не превышал 3 мм. Расчёты показывают, что без применения пластин размер пучка на 6 м составил бы приблизительно 18 мм. Таким образом, использование каскада пластин позволило обеспечить низкую расходимость пучка и существенно увеличить дистанцию его эффективного распространения до 6 м. Для демонстрации сохранения высокой интенсивности был осуществлен поджиг высоковольтного разряда на расстоянии 6 м от фокуса. Без каскада пластин разряд поджигался на расстоянии до 2.5 м.

Таким образом, применение каскада стеклянных пластин позволяет эффективно поддерживать высокую интенсивность на больших расстояниях.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 24-12-00056)

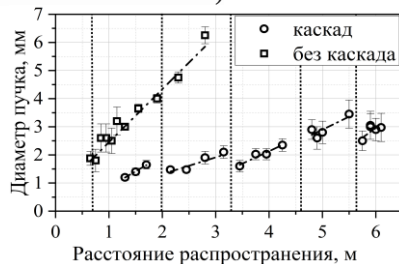


Рис. 1. Зависимость диаметра пучка от расстояния распространения с каскадом пластин и при свободном распространении

#### Список литературы

1. La Fontaine B., et al. // Phys. Plasmas. 1999. V. 6. No. 5. P. 1615-1621.

Т.С. МОЛЬКОВ, И.Л. МАРТЫНОВ, С.В. ФАДЕЕВ,  
А.А. ПЛЕХАНОВ, А.А. ЧИСТЯКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **МЕТАЛЛОСЕТЧАТЫЕ ПОЛОСОВЫЕ ФИЛЬТРЫ ДЛЯ ГАРМОНИК ТЕРАГЕРЦОВОГО IMPATT ДИОДА, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ**

Приведены результаты изготовления и измерения спектров пропускания металросетчатых полосовых фильтров терагерцового диапазона, изготовленных из медной фольги методом лазерной абляции. Геометрические параметры структуры поверхности подобраны на основе моделирования и согласованы с частотами гармоник IMPATT диода, работающего в терагерцовом диапазоне.

T.S. MOLKOV, I.L. MARTYNOV, S.V. FADEEV,  
A.A. PLEKHANOV, A.A. CHISTYAKOV

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

## **METAL-MESH BANDPASS FILTERS FOR HARMONICS OF A TERAHERTZ IMPATT DIODE FABRICATED BY LASER ABLATION**

The results of manufacturing and measuring the transmission spectra of metal-mesh bandpass filters of the terahertz range made of copper foil by laser ablation are presented. The geometric parameters of the surface structure were selected based on modeling and matched to the harmonic frequencies of the IMPATT diode operating in the terahertz range.

В настоящее время наблюдается устойчивый интерес к применению терагерцового (ТГц) излучения в научных исследованиях и прикладных задачах. В этой связи непрерывно развивается техника, связанная с генерацией, регистрацией и управлением ТГц-излучением. В частности, мощность современных IMPATT диодов (Terasense Group, Inc.), работающих в ТГц-диапазоне на частоте 0.29 ТГц достигает 20 мВт. При этом в их спектре наблюдаются гармоники, вплоть до частоты 1.45 ТГц, что в перспективе открывает возможности их использования в рамках ТГц-спектроскопии, в том числе в прикладных задачах [1]. В связи с этим возникает необходимость поиска способов эффективного управления спектром излучения такого IMPATT диода.

Целью настоящей работы является создание полосовых фильтров ТГц-диапазона, применимых для отсека гармоник IMPATT диода (Terasense Group, Inc.), на основе металло-сетчатых структур [2].

В рамках работы было проведено моделирование параметров рисунка полосового фильтра для резонансного пропускания на частотах, соответствующих гармоникам используемого IMPATT диода. Серия подобных структур была изготовлена и далее проведена их характеристика.

Элемент периодического рисунка поверхности фильтра имел крестообразную форму [3] и геометрические размеры на уровне 100 мкм. Общий линейный размер изготовленных структур составлял около 1 см. В качестве метода их изготовления выбрана лазерная абляция, так как она сочетает в себе необходимую для исследовательской работы гибкость и приемлемую точность изготовления [2, 4]. В качестве основы для изготовления фильтров была использована медная фольга толщиной 10 мкм. Для абляции использовалось излучение второй гармоники YAG:Nd лазера с длительностью импульса 500 пс, энергией в импульсе 80 мкДж. Для фокусировки применялся объектив Nikon Plan Fluor 10x/0.3.

Для измерения спектров пропускания изготовленных образцов использовался ТГц фурье-спектрометр со спектральным разрешением 20 ГГц [5]. Полученные полосовые фильтры обладают уединённой полосой пропускания с минимальной шириной порядка 150 ГГц и максимумом пропускания до 70 %. Максимум пропускания соответствовал частотам генерации IMPATT диода.

#### *Список литературы*

1. Плеханов А.А. и др. Спектральная идентификация нитросоединений с использованием терагерцового источника на основе лавинно-пролетного диода // Письма в Журнал технической физики. 2024. Т. 50 (7). С. 35-38.
2. Voisiat B., et al. Band-pass filters for THz spectral range fabricated by laser ablation // Applied Physics A. 2011. V. 104 (3). P. 953-958.
3. Melo A.M., et al. Cross-shaped terahertz metal mesh filters: historical review and results // Advances in Optical Technologies. 2012. V. 2012 (1). P. 530512.
4. Wang Q., et al. Design, fabrication, and modulation of THz bandpass // Laser & photonics reviews. 2019. V. 13 (11). P. 1900071.
5. Plekhanov A.A., et al. Study of terahertz reflection spectra of optically thin RDX samples by terahertz imaging with spectral resolution // Optical Engineering. 2023. V. 62 (3). P. 034109-034109.



Е.А. ВАШУКЕВИЧ, Р. СУРМАЙ, В.А. ЛЕОНОВ  
*Санкт-Петербургский государственный университет*

## **ПЕРЕПУТЫВАНИЕ ДВУХ КУДИТОВ ПРОИЗВОЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ФАРАДЕЕВСКОГО СВЕТОАТОМНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ**

В работе рассматривается обобщение процедуры перепутывания светового и атомного кубитов с помощью Фарадеевского взаимодействия и фазовых задержек на случай многомерных логических объектов – кудитов. Проведён анализ условий, обеспечивающих выполнение операции с заданной силой перепутывания, и найдены значения физических параметров системы, обеспечивающих выполнение таких операций. Показано, что такие значения параметров инвариантны относительно размерности задачи. Кроме того, в работе представлен расчёт вероятностей выполнения перепутывающих операций в зависимости от силы перепутывания.

E.A. VASHUKEVICH, R. SURMAY, V.A. LEONOV  
*Saint Petersburg State University*

## **ENTANGLEMENT OF TWO QUDITS OF ARBITRARY DIMENSIONALITY VIA FARADAY LIGHT-ATOMIC INTERACTION**

The paper presents a generalization of the procedure for entangling light and atomic qubits via Faraday interaction and phase delays to the case of multidimensional logical objects – qudits. An analysis of the conditions ensuring the implementation of the operation with a given entanglement power is performed, and the values of the system's physical parameters that enable such operations are found. It is shown that these parameter values are invariant with respect to the dimensionality of the system. Furthermore, the paper presents a calculation of the probabilities of successful entangling operations depending on the entanglement strength.

В области квантовых вычислений одним из самых перспективных направлений являются квантовые вычисления в дискретных переменных. Однако, для построения универсального квантового вычислителя необходимо уметь выполнять так называемые перепутывающие двухкубитные операции, которые имеют вероятностный характер. Кроме того, значительно усложняется коррекция ошибок. Самым важным фактором, ограничивающим масштабирование квантовых вычислителей, является проблема декогеренции [1]. Выбор фотонов в качестве

платформы для квантовых вычислений обусловлен устойчивостью их к декогеренции, высокой скоростью передачи информации, а также разработанной технической базой для манипулирования и генерации квантовых состояний света.

Интерес для квантовых вычислений в дискретных переменных также представляют гибридные свето-атомные системы, где кодирование логических состояний происходит через состояния разной физической природы. Как показано в работе [2], рассмотрение многомерной степени свободы, например, орбитального углового момента света, в качестве кодирующей информацию, позволяет в светоатомных системах переходить к логическим объектам высокой размерности – кудитам. Важной особенностью свето-атомных систем является также возможность осуществлять хранение квантовой информации на долгоживущих атомных степенях свободы наряду с логическими операциями [3].

Мы рассматриваем расширение двухкубитного протокола перепутывания атомных и световых кубитов [4, 5] на кудитный случай.

В настоящей работе мы показываем, что варьирование констант взаимодействия и углов поворота квадратур в описываемом протоколе позволяет генерировать широкий спектр двухкудитных перепутывающих и нелокальных логических операций. Важным результатом является инвариантность параметров, обеспечивающих выполнение некоторой перепутывающей операции, относительно размерности логического пространства. В работа также рассчитаны вероятности генерации операций в зависимости от силы перепутывания.

Работа была поддержана Фондом развития теоретической физики и математики «Базис» (грант № 22-1-4-20-1).

#### *Список литературы*

1. Li J. Some Progress on Quantum Error Correction for Discrete and Continuous Error Models // IEEE Access. 2020. V. 8. P. 46998-47012.
2. Vashukevich E.A., et al. Conversion and storage of modes with orbital angular momentum in a quantum memory scheme // Physical Review A. 2020. No. 101 (3). P. 033830.
3. Vashukevich E.A., et al. High-fidelity quantum gates for OAM single qudits on quantum memory // Laser Physics Letters. 2022. V. 19. No. 2. P. 025202.
4. Vashukevich E.A., Golubeva T.Y. Parallel two-qubit entangling gates via a quantum nondemolition interaction controlled by rotation // Physical Review A. 2024. V. 110. No. 3. P. 032616.
5. Bashmakova E.N., Vashukevich E.A., Golubeva T.Y. Parallel multi-two-qubit SWAP gate via quantum nondemolition interaction of orbital-angular-momentum light and an atomic ensemble // Physical Review A. 2024. V. 109. No. 1. P. 012428.

А.А. ДЕРГАЧЕВ, С.А. ШЛЕНОВ

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

## **САМОВОЗДЕЙСТВИЕ ОПТИЧЕСКОГО ВИХРЯ, ФОРМИРУЕМОГО СПИРАЛЬНОЙ ФАЗОВОЙ ПЛАСТИНКОЙ ИЗ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО ГАУССОВА ПУЧКА**

Приведены результаты вычислительных экспериментов по распространению эллиптического гауссова пучка за спиральной фазовой пластинкой в нелинейной среде. Определена физическая картина формирования «горячих точек» в таком пучке. Выполнен анализ влияния амплитудно-фазового шума в начальных условиях.

A.A. DERGACHEV, S.A. SHLENOV

*Lomonosov Moscow State University*

## **SELF-ACTION OF AN OPTICAL VORTEX FORMED BY A SPIRAL PHASE PLATE FROM AN ELLIPTICAL GAUSSIAN BEAM**

The results of computational experiments on the propagation of an elliptical Gaussian beam behind a spiral phase plate in a nonlinear medium are presented. The physical pattern of the formation of "hot spots" in such a beam is determined. The effect of amplitude-phase noise in the initial conditions is analyzed.

Управление нелинейным режимом распространения лазерного излучения является важной частью прикладных задач диагностики естественных сред и создания областей микромодификаций в объёме прозрачных диэлектриков [1]. С использованием вихревых пучков можно получить кольцевую структуру излучения [2, 3], которая при самовоздействии распадается на отдельные горячие точки [4]. Анализ влияния эллиптичности пучка на сегментацию оптического вихря и формирование картины горячих точек в его поперечном сечении, в том числе, при наличии амплитудно-фазового шума является предметом настоящего исследования.

Численный расчёт поля гауссова пучка эллиптической формы за соосной спиральной фазовой пластинкой с топологическим зарядом  $m$  выполнялся в рамках параболического уравнения дифракции с мгновенной керровской нелинейностью [5] и дефокусирующей нелинейностью пятого порядка.

В результате выполненных численных экспериментов получена физическая картина формирования горячих точек в вихревом эллиптическом пучке (рис. 1). Её отличительной особенностью является одновременное формирование парных горячих точек, расположенных симметрично относительно фазовой дислокации на большой оси поворачивающегося эллипса. Они образуются в местах локальных максимумов интенсивности на фоне кольцевой структуры, возникающей в результате интерференции расходящегося от точки фазовой дислокации излучения с внеосевой частью пучка. С ростом мощности излучения в поперечном сечении пучка наблюдаются области вторичной фокусировки в окрестности первичных максимумов. При этом сами первичные горячие точки формируются раньше и располагаются ближе к исходному положению большой оси эллипса.

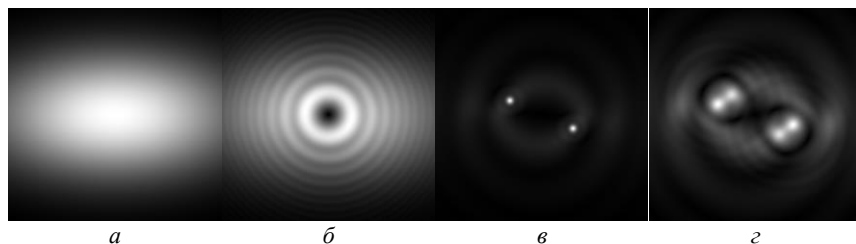


Рис. 1. Интенсивность в поперечных сечениях эллиптического гауссова пучка за спиральной фазовой пластинкой с топологическим зарядом  $m = 1$  в нелинейной среде на расстояниях  $z = 0$  (а),  $0,03$  (б),  $0,13$  (в),  $0,16$  (г) дифракционной длины пучка с тем же параметром эллиптичности  $e = 0,5$ , мощность  $P$  в 10 раз превышает критическую мощность  $P_{cr}$  безвихревого пучка

В работе также получены результаты влияния амплитудно-фазового шума на физическую картину формирования горячих точек в вихревом эллиптическом пучке.

#### Список литературы

1. Kandidov V.P., Kosareva O.G., Shlenov S.A., et al. // Quantum Electron. 2005, V. 35. P. 59.
2. Fu S., Mahieu B., Mysyrowicz A., Houard A. // Opt. Lett. 2022. V. 47. P. 5228.
3. Котляр В.В., Ковалев А.А. Ускоряющиеся и вихревые лазерные пучки. М.: Физматлит, 2018.
4. Dormidonov A.E., et al. // Proc SPIE. 2007. V. 6733. P. 67332S.
5. Dergachev A.A., Shlenov S.A. // Bull. of the Lebedev Phys. Inst. 2023. V. 50. No. 9. P. S1022.

Е.В. ТИМОЩЕНКО, В.А. ЮРЕВИЧ<sup>1</sup>

*Могилёвский государственный университет им. А.А. Кулешова, Беларусь*

*<sup>1</sup>Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий,  
Могилёв, Беларусь*

## **СВЕРХИЗЛУЧЕНИЕ В РЕЗОНАТОРЕ В УСЛОВИЯХ КВАДРАТИЧНОГО ЭФФЕКТА ШТАРКА**

На основе модификации уравнений Максвелла–Блоха проанализировано влияние на ход сверхизлучения нелинейных факторов неустойчивости фазового соотношения светового поля и резонансной поляризованности усиливающего элемента в схеме лазера. Механизмы динамической неустойчивости порождены эффектом Штарка, нелинейной рефракцией и диполь-дипольным взаимодействием элементарных квантовых излучателей.

E.V. TIMOSCHENKO, V.A. YUREVICH<sup>1</sup>

*<sup>1</sup>Mogilev State A. Kuleshov University, Belarus*

*<sup>2</sup>Belarussian State University of Food and Chemical Technologies, Mogilev, Belarus*

## **SUPERRADIANCE IN A CAVITY UNDER QUADRATIC STARK EFFECT CONDITIONS**

Based on a modification of the Maxwell–Bloch equations, the influence on the superradiance kinetics of the nonlinear factors of instability of the phase ratio of the light field and the resonant polarization of the amplifying element in the laser circuit is analyzed. The mechanisms of dynamic instability are stimulated by the Stark effect, nonlinear refraction and the dipole-dipole interaction of elementary quantum emitters.

Когерентный оптический эффект сверхизлучения (СИ) активно используется для оптимизации выходных характеристик импульсных источников когерентного излучения [1]. В условиях применения усиливающих сред на основе предельно компактных структур с высокой концентрацией резонансных центров, в числе которых массивы полупроводниковых квантовых точек (КТ) [2], вероятны эффекты фазовой нелинейности. Фазовая неустойчивость излучения в лазерном резонаторе способна выступить действенным фактором амплитудной модуляции [3].

В настоящей работе процесс СИ для параметров полупроводниковых структур на основе КТ моделируется для физической ситуации с присутствием эффекта Штарка, влияния ближних полей на положение

резонанса усиления на спектральной шкале, а также нелинейной рефракции, вызванной поглощением поля в квазирезонансных переходах.

В рамках формализма вектора Блоха аналогично [4] получены уточнённые решения системы уравнений Блоха для вероятностных переменных отклика среды (поляризованности  $R(t)$  и инверсии  $n(t)$ ), применимые для произвольного временного профиля в резонаторе поля

$$R = \sin \psi, \quad n = \cos \psi, \quad \psi(t) = \frac{1}{1 - \beta\gamma} \left( \int_{-\infty}^t S \cos \Delta\varphi dt - \beta\gamma R \right),$$

где  $\psi(t)$  – полярный угол вектора Блоха,  $\Delta\varphi$  – разность фаз поля и поляризованности,  $\beta$  – коэффициент штарковского смещения,  $\gamma$  – нормирующий параметр в поправке Лоренца. Уравнения для поля, выражаемого нормированной переменной  $S$  (частотой Раби), численно интегрировались в системе с приведёнными выше соотношениями. Расчёт проведён для параметров массивов КТ, примерно соответствующих [2].

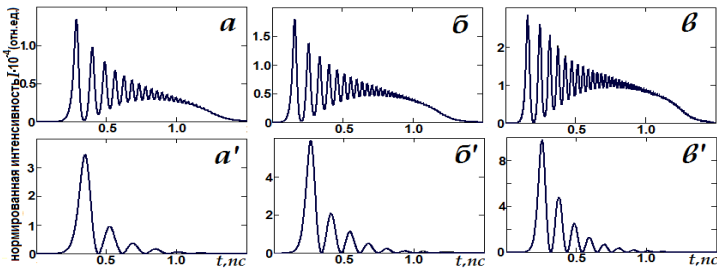


Рис. 1. Временная развёртка интенсивности СИ для различных концентраций КТ

Зависимости, приведённые на рис. 1, показали высокую критичность структуры СИ по отношению к резонансной нелинейности материального отклика. Развёртки (рис. 1а - в) рассчитаны для нарастающих значений концентрации КТ (снижения характерного времени СИ). На фрагментах (рис. 1а' - в') для сравнения приведены «классические» варианты зависимостей СИ. Характерно, что в условиях нелинейности типичная для импульсов СИ нутационная временная структура интенсивности должна трансформироваться в выраженную квазипериодическую модуляцию заднего фронта основного импульса в субпикосекундном диапазоне.

#### Список литературы

1. Кочаровский В.В. и др. // УФН. 2017. Т. 187 (4). С. 367.
2. Zhukov A.E., et al. // Opt. Letters. 2024. V. 49(2). P. 330.
3. Wilson M. // Physics Today. 2018. V. 71(12). P. 18.
4. Timoshchenko E.V., Yurevich V.A. // Uchenye Zapiski Kazanskogo Univ. Seriya Fiz.- Mat. Nauki. 2021. V. 163 (1). P. 21.

Д.Н. МАКАРОВ, М.Ю. АРХИПОВ

*Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова,  
Архангельск*

## **НЕПЕРТУРБАТИВНОЕ СЕЧЕНИЕ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ ОДНОМОДОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СВОБОДНОМ ЭЛЕКТРОНЕ**

В рамках непerturbативного подхода получено сечение томсоновского рассеяния одномодового излучения на свободном электроне. На основе точного решения уравнения Шредингера получена аналитическая формула, обобщающая классический результат. Показано, что сечение монотонно убывает с ростом параметра, характеризующего поперечный размер пучка. Также подтверждается выполнение принципа соответствия.

D.N. MAKAROV, M.Yu. ARKHIPOV

*Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk*

## **NONPERTURBATIVE CROSS SECTION OF THOMSON SCATTERING OF SINGLE-MODE RADIATION ON A FREE ELECTRON**

A nonperturbative approach is used to obtain the cross section for Thomson scattering of single-mode radiation by a free electron. Based on an exact solution of the Schrödinger equation, an analytical formula that generalizes the classical result is derived. It is shown that the cross section decreases monotonically with an increase in the parameter characterizing the transverse beam size. The correspondence principle is also confirmed.

Томсоновское рассеяние, процесс упругого взаимодействия фотонов со свободными электронами, представляет собой фундаментальное явление в электродинамике [1]. Теория томсоновского рассеяния находит широкое практическое применение в таких областях, как астрофизика [2] и диагностика плазмы [3]. Несмотря на свою концептуальную простоту, точного непerturbативного решения для этого процесса в рамках квантовой электродинамики не существует. Количественно процесс рассеяния принято характеризовать сечением рассеяния.

Целью работы является получение непerturbативной формулы для сечения рассеяния в рамках общей квантовой теории томсоновского

рассеяния в случае рассеяния одномодового излучения на свободном электроне.

Используя точное решение уравнения Шредингера для системы свободных электронов в квантованном поле падающего и рассеянного излучения [4] и определение сечения рассеяния, в работе была получена непertурбативная формула для полного сечения  $\sigma$  томсоновского рассеяния монохроматического излучения с частотой  $\omega_0$ . На рис. 1 представлен график зависимости отношения  $\sigma/\sigma_{cl}$  от безразмерного параметра  $x = 4\pi/\sigma_0 c \omega_0$  (в атомной системе единиц), где  $\sigma_{cl}$  определяется классической формулой Томсона,  $\sigma_0$  – характерная площадь поперечного сечения пучка.

Из приведённого графика можно видеть, что  $\sigma \rightarrow \sigma_{cl}$  при  $x \rightarrow 0$ , при этом наша теория переходит в классическую. Также  $\sigma \rightarrow 0$  при  $x \rightarrow \infty$ . Таким образом, при увеличении площади  $\sigma_0$  увеличивается вероятность взаимодействия.

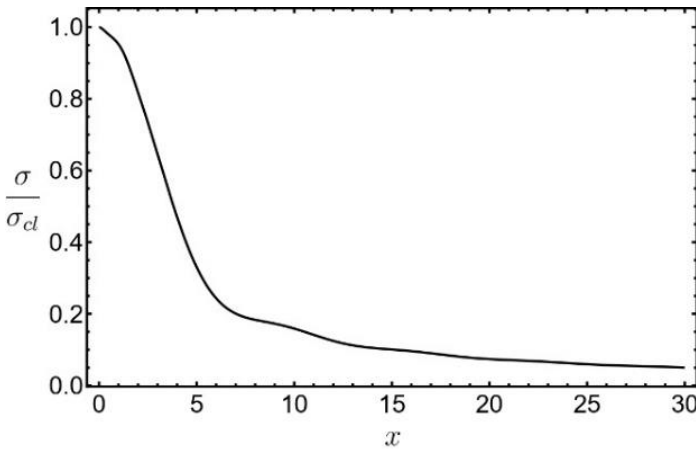


Рис. 1. График зависимости  $\sigma/\sigma_{cl}$  от параметра  $x$

Работа поддержана государственным заданием № FSRU-2024-0005.

#### Список литературы

1. Thomson J.J. // Proceedings of the London Mathematical Society. 1883. V. 1. P. 197-219.
2. Longair M.S. // High-Energy Astrophysics. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
3. Prunty S.A. // Physica Scripta. 2014. V. 89. P. 128001.
4. Makarov D.N. // Results in Physics. 2023. V. 52. P. 106790.



А.А. СОЛОДОВНИКОВ, И.И. КАЗАКОВ, С.А. КОЗЛОВ

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **ДИАПАЗОН УСИЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ТРАНЗИСТОРА НА ОСНОВЕ БЕЗЗЕРКАЛЬНОГО НЕЛИНЕЙНОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ-ПЕРО В ТЕРАГЕРЦОВОМ СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ**

Получены выражения, определяющие интенсивности излучения, при которых в нелинейном интерферометре Фабри-Перо может наблюдаться дифференциальное усиление слабого сигнала. Выявлена связь между параметрами интерферометра и величиной диапазона усиления. Проведены численные оценки величины диапазона усиления для беззеркального нелинейного интерферометра Фабри-Перо на основе кристалла ниобата лития в терагерцовом диапазоне.

A.A. SOLODOVNIKOV, I.I. KAZAKOV, S.A. KOZLOV

*ITMO University, Saint Petersburg*

## **OPTICAL TRANSISTOR AMPLIFICATION RANGE BASED ON A MIRRORLESS NONLINEAR FABRY-PEROT INTERFEROMETER IN THE TERAHERTZ SPECTRAL RANGE**

Expressions are obtained that determine the radiation intensities at which differential gain of a weak signal can be observed in a nonlinear Fabry-Pérot interferometer. The relationship between the interferometer parameters and magnitude of the amplification range is revealed. Numerical estimates of magnitude of the amplification range for a mirrorless nonlinear Fabry-Pérot interferometer based on a lithium niobate crystal in the terahertz range are performed.

Ещё в конце прошлого века активно изучались интерферометры с нелинейной рабочей средой в качестве основы для полностью оптических устройств управления излучением [1]. Отсутствие материалов, обладающих большой по величине и вместе с тем малоинерционной нелинейностью показателя преломления, не позволило тогда в полной мере реализовать некоторые идеи. Благодаря недавним исследованиям в ряде материалов в терагерцовом (ТГц) диапазоне частот была обнаружена гигантская по величине малоинерционная нелинейность показателя преломления колебательной природы [2, 3]. Эти открытия поднимают интерес к изучению нелинейных интерферометров и возможности их применения в устройствах сверхбыстрой фотоники в ТГц-диапазоне.

В работе [4] проводился анализ особенностей функции пропускания интерферометра Фабри-Перо, заполненного средой с кубической нелинейностью, в поле излучения ТГц-диапазона. Были определены условия максимального дифференциального усиления слабого по амплитуде ТГц оптического сигнала в поле высокоинтенсивной волны накачки. В настоящей работе рассмотрена другая важная характеристика режима дифференциального усиления – диапазон усиления. Это интервал входных интенсивностей излучения, при которых первая производная функции пропускания больше единицы – благодаря этому обеспечивается увеличение на выходе амплитуды входящего сигнала (рис. 1).

В работе получены выражения, позволяющие рассчитывать величину диапазона усиления и соответствующие ему граничные интенсивности. Приведены численные оценки для беззеркального интерферометра из пластины ниобата лития в поле ТГц-излучения. Показано, что, например, при толщине пластины в 1115 мкм эффект дифференциального усиления может наблюдаться для интенсивностей накачки от  $4.98 \cdot 10^7$  до  $6.38 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>. Величина диапазона усиления равна  $1.40 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>.

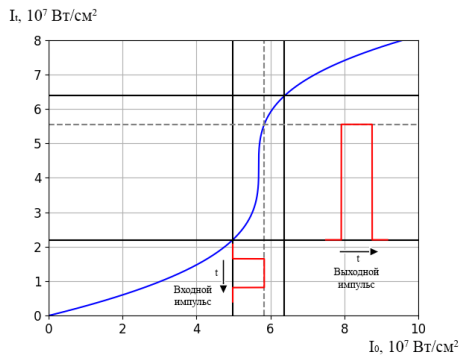


Рис. 1. Иллюстрация дифференциального усиления сигнала в интерферометре:

$I_0$  и  $I_t$  – интенсивности излучения на входе и на выходе из интерферометра соответственно

#### Список литературы

1. Gibbs H. Optical bistability: controlling light with light // Elsevier. 2012.
2. Nabilkova A., Guselnikov M., et al. // Optics Letters. 2025. V. 50. No. 15. P. 4778-4781.
3. Zhukova M.O., Melnik M.V., et al. // Photonics. 2020. V. 7. No. 4. P. 98.
4. Казаков И.И., Гусельников М.С., Козлов С.А. // Известия РАН. Серия физическая. 2025. Т. 89. № 1. С. 57-62.

Н.И. ПЕТРОВ, Ю.М. СОКОЛОВ, В.В. СТОЯКИН,  
В.А. ДАНИЛОВ, В.В. ПОПОВ<sup>1</sup>, Б.А. УСИЕВИЧ<sup>2</sup>

*Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва*

<sup>1</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

<sup>2</sup>*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

## **ПОВЕРХНОСТНЫЙ ПЛАЗМОННЫЙ РЕЗОНАНС В СУБВОЛНОВЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЁТКАХ**

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование дифракционной эффективности субволновых решёток из никеля, серебра и золота в условиях возбуждения поверхностного плазмонного резонанса (ППР). Показано, что оптимальные условия для возбуждения ППР зависят от материала и геометрических параметров решётки.

N.I. PETROV, Yu.M. SOKOLOV, V.V. STOIAKIN, V.A. DANILOV,  
V.V. POPOV<sup>1</sup>, B.A. USIEVICH<sup>2</sup>

*Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow*

<sup>1</sup>*Lomonosov Moscow State University*

<sup>2</sup>*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*

## **SURFACE PLASMON RESONANCE IN SUBWAVELENGTH DIFFRACTION GRATINGS**

A theoretical and experimental study of the diffraction efficiency of subwavelength gratings made of nickel, silver and gold under conditions of surface plasmon resonance (SPR) excitation has been carried out. It is shown that the optimal conditions for the excitation of SPR depend on the material and geometric parameters of the grating.

Исследование поверхностных электромагнитных волн в субволновых структурах представляет практический интерес для создания нанофотонных устройств и модуляторов света, различных сенсоров и оптических переключателей. Ранее нами было установлено, что в условиях возбуждения поверхностного плазмонного резонанса (ППР) в субволновых дифракционных решётках происходит значительное усиление таких эффектов как сдвиг Гуса–Хенкен и фотонный спиновый эффект Холла [1 - 4]. Поэтому является важным определение оптимальных условий возбуждения ППР.

В настоящей работе исследовано влияние материала и геометрических параметров решётки на возбуждение ППР. Найдены оптимальные условия

для взаимодействия падающего света с поверхностной плазмонной волной в субволновых дифракционных решётках из никеля, серебра и золота (рис. 1), когда достигается минимальное отражение света от решётки. Если глубина решётки отличается от оптимальной, значение минимального коэффициента отражения увеличивается. Оптимальная глубина зависит от периода и материала решётки [1 - 3].

Показано, что для никелевой, серебряной и золотой решётки с периодом  $\Lambda = 400$  нм, оптимальные глубины  $h$  составляют 80, 20 и 30 нм, соответственно. Видно, что резонансные углы падения пучка света зависят также от материала решётки (рис. 2). Показана высокая чувствительность кривой отражения к периоду и высоте, а также к изменению диэлектрической проницаемости решётки. Это свойство может использоваться для сверхточного определения параметров решётки и диэлектрической проницаемости материала.

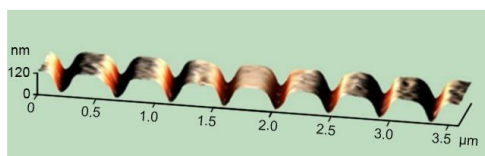


Рис. 1. АСМ-изображение решётки с периодом  $\Lambda = 400$  нм

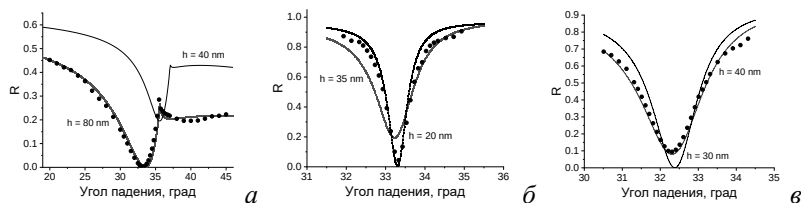


Рис. 2. Коэффициенты отражения в зависимости от угла падения: никель (а), серебро (б), золото (в), сплошные кривые – теория, точки – эксперимент

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного задания FFNS-2025-0007.

#### Список литературы

1. Petrov N.I., Danilov V.A., Popov V.V., Usievich B.A. // Optics Express. 2020. V. 28. P. 7552-7564.
2. Petrov N.I., Sokolov Y.M., Stoiakin V.V., Danilov V.A., Popov V.V., Usievich B.A. // Photonics. 2023. V. 10. P. 180.
3. Petrov N.I., Sokolov Y.M., Stoiakin V.V., Danilov V.A., Popov V.V., Usievich B.A. // Opt. Lett. 2025. V. 50. P. 1317-1320.
4. Петров Н.И., Соколов Ю.М., Стоякин В.В., Данилов В.А., Попов В.В., Усевич Б.А. // Письма в ЖЭТФ. 2025. Т. 122. Вып. 10. С. 612-618.

Ю.Э. ГЕЙНЦ, О.В. МИНИНА<sup>1</sup>

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск*

*<sup>1</sup>Российский университет транспорта (МИИТ), Москва*

## **БАРОМЕТРИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ФИЛАМЕНТАЦИЕЙ МОЩНЫХ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ВОЗДУХЕ**

Проведено компьютерное моделирование распространения коллимированного излучения титан-сапфирового лазера фемтосекундной длительности при варьировании давления в среде распространения. Численные расчёты выполнялись для интегрированного по времени нелинейного уравнения Шредингера для огибающей оптического поля. На основе законов масштабирования, которые связывают давление в среде и начальные параметры мощных ультракоротких лазерных импульсов, были рассмотрены условия образования нелинейного фокуса при самофокусировке излучения, параметры формируемой области филаментации, а также характеристики постфиламентов. Сделаны обобщающие выводы, позволяющие использовать полученные результаты на реальных атмосферных трассах протяженностью в сотни метров.

Yu.E. GEINTS, O.V. MININA<sup>1</sup>

*V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the RAS, Tomsk*

*<sup>1</sup>Russian University of Transport (MIIT), Moscow*

## **BAROMETRIC CONTROL OF FILAMENTATION OF HIGH-POWER FEMTOSECOND LASER PULSES IN AIR**

Computer simulations of the propagation of collimated femtosecond-duration Ti:sapphire laser radiation are carried out with varying pressure in the propagation medium. Calculations were performed for a time-integrated nonlinear Schrödinger equation for the optical field envelope. The formation of a nonlinear focus during the radiation self-focusing and a filamentation region, as well as and the characteristics of postfilaments are examined. The obtained results are able to be applied to real atmospheric paths hundreds of meters long.

Одним из перспективных подходов к управлению параметрами самофокусировки, филаментации и постфиламентационного каналирования является изменением давления в среде распространения [1, 2] мощных фемтосекундных лазерных импульсов (МФЛИ). В [3] показано, что такой барометрический подход позволяет использовать

результаты, полученные в лабораторных условиях, для масштабирования на протяженные трассы и прогнозирования распространения в атмосфере.

В данной работе представлены результаты численного исследования распространения МФЛИ при их самовоздействии в сжатом воздухе. Методика численного моделирования на основе интегрированного по времени нелинейного уравнения Шредингера [4] подробно описана в [3]. Рассмотрены случаи распространения МФЛИ с длиной волны 0,8 мкм при варьировании начального радиуса пучка  $R_0$ , относительной пиковой мощности  $\eta$  [3] и давления среды  $p$ . Примеры полученных результатов показаны на рис. 1, где  $L_R$  – длина Рэлея. Особое внимание уделено формированию нелинейного фокуса, структуре области филаментации и характеристикам постфиламентов (области I-III на рис. 1б).

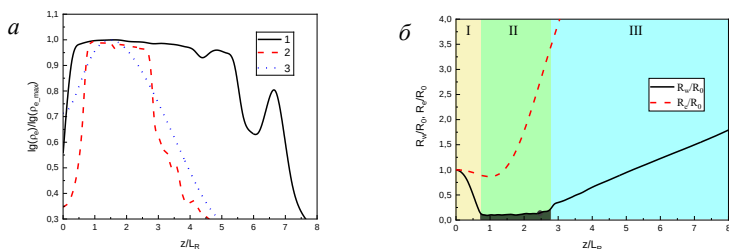


Рис. 1. Изменение плотности плазмы вдоль трассы в нормированных координатах: кривая 1 –  $p = 0,25$  атм,  $R_0 = 2$  мм,  $\eta = 16$ ; кривая 2 –  $p = 1$  атм,  $R_0 = 1$  мм,  $\eta = 4$ ; кривая 3 –  $p = 4$  атм,  $R_0 = 0,5$  мм,  $\eta = 1$  (a), изменения относительного эффективного радиуса пучка  $R_e/R_0$  и относительного поперечного масштаба плотности энергии по уровню  $e^{-1} R_w/R_0$  вдоль трассы для случая, соответствующего кривой 2 (б), темно-серым отмечена область филаментации

Полученные результаты расширяют представления о многофакторном характере филаментации МФЛИ на протяженных трассах, а также показывают перспективы для оптимизации и расширения спектра практических приложений (например, для дистанционной диагностики компонент атмосферы и передачи энергии на протяженных трассах).

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект № 24-12-00056).

#### Список литературы

1. Kompanets V.O., Shipilo D.E., Nikolaeva I.A., et al. // JETP LETT. 2020. V. 111. P. 31-35.
2. Li S., Yu M., Cai X., et al. // Optoelectron. Lett. 2023. V. 19. No. 10. P. 605-613.
3. Geints Y.E. // Optics Communications. 2024. V. 573. P. 131007.
4. Berge L., Skupin S., Lederer F., et al. // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 92. P. 225002.

Н.М. ГЕРАСИМОВ<sup>1</sup>, А.Е. ТЕРЕТЕНКОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

<sup>2</sup>Математический институт им. В.А. Стеклова РАН, Москва

## **ПОВТОРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ИХ ИНВАЗИВНОСТЬ В ЗАДАЧАХ КВАНТОВОЙ ТЕРМОМЕТРИИ**

Построена схема повторных измерений температуры образца с неизвестным состоянием по изменению окружения, представленного системой с заготовленным состоянием. Получены формулы для расчёта температуры, переданной в ходе взаимодействия энергии, а также теплоёмкости образца. В качестве примера произведены расчёты для кубита и обобщённой многоуровневой системы.

N.M. GERASIMOV<sup>1</sup>, A.E. TERETENKOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University

<sup>2</sup>Steklov Mathematical Institute of the RAS, Moscow

## **REPEATED MEASUREMENTS AND INVASIVENESS IN QUANTUM THERMOMETRY**

A scheme for repeated temperature measurements of a sample with an unknown state based on changes in the environment represented by a system with a predetermined state was constructed. Formulas were derived for calculating the temperature of the energy transferred during the interaction, as well as the heat capacity of the sample. Calculations for a qubit and a generalized multilevel system were used as examples.

Вопросы квантовой термометрии и инвазивности [1] представляют большой интерес для ряда областей, включая квантовую оптику, квантовые вычисления и квантовую теорию информации. Описание температуры в квантовых системах дает доступ к термодинамическому описанию эволюции состояния и позволяет воспользоваться результатами статистической физики. Как было показано в [2], повторные измерения имеют ряд преимуществ перед однократными. Сложность заключается в том, что измерения параметров системы имеют накопительный эффект, в связи с чем необходимо накладывать ограничения на их количество в чувствительных к внешнему воздействию системах, например, в случае исследований, связанных с критически низкими температурами.

Целью работы является развитие описания инвазивности повторных измерений температуры. Имея теоретическую оценку количества энергии, передаваемого системе в ходе измерений, можно рассчитать предельное

количество измерений, которые можно провести на одном образце [3]. Развитие данного подхода позволит оптимизировать процесс исследования или создания квантовых технологий.

В основе описания процесса квантовых измерений лежит теория открытых квантовых систем. Измерительным прибором служит система с заготовленным состоянием, которая приводится в контакт с исследуемым образцом и становится для него окружением. По изменению состояния окружения можно определить параметры исследуемого образца.

Измерение интересующего параметра можно описать путём сопоставления некоторого состояния  $S$  системы с состоянием анзаца:

$$S(g) = S_\varepsilon(g).$$

В задачах квантовой термометрии в качестве анзаца выбирается анзац Гиббса, поскольку именно гиббсовское состояние дает информацию о температуре системы:

$$\rho_{Gibbs}(\beta) = e^{-(\beta, P)} / \text{Tr} Z(\beta),$$

где  $\beta = 1/kT$  – обратная температура,  $Z(\beta) = \text{Tr} e^{-(\beta, P)}$  – статистическая сумма и  $P$  – наблюдаемая.

В стробоскопическом пределе можно описать динамику системы с помощью следующего выражения:

$$\dot{E}(t) + \frac{1}{2}\Delta\dot{E}(t) = \text{Tr} \dot{P} e^{\lambda\Delta t\epsilon} \rho_{ans} \left( \dot{E}(t) - \frac{1}{2}\Delta\dot{E}(t) \right)$$

Для описания инвазивности необходимо решить уравнение вида:

$$E = \partial/\partial\beta * \ln Z(\beta).$$

В случае кубита во внешнем поле получены следующие выражения для расчёта инвазивности, температуры и теплоёмкости:

$$E(t) = e^{-(\gamma(1+e^{-\beta_0\omega_0})+4\Omega^2\Delta t)t} (E(0) - E_{st}) + E_{st},$$

где

$$E_{st} = \omega_0 \frac{\gamma e^{-\beta_0\omega_0} + 2\Omega^2\Delta t}{\gamma(1 + e^{-\beta_0\omega_0}) + 4\Omega^2\Delta t},$$

$$\beta_{st} = \beta_0 - \frac{1}{\omega_0} \ln \frac{1 + \frac{2\Omega^2\Delta t}{\gamma} e^{\beta_0\omega_0}}{1 + \frac{2\Omega^2\Delta t}{\gamma}}.$$

#### Список литературы

1. Albarelli F., Paris M.G.A., Vacchini B., Smirne A. Invasiveness of nonequilibrium quantum thermometry // Phys. Rev. A. 2023. V. 108. P. 062421,
2. De Pasquale A., Yuasa K., Giovannetti V. Estimating temperature via sequential measurement // Phys. Rev. A. 2016. V. 96, P. 012316.
3. Gerasimov N.M., Teretenkov A.E. Repeated temperature measurements in quantum thermodynamics // Lobachevskii J. Math. 2025. V. 46. No. 6. P. 2501-2512.



Г.А. КОЛОСОВ, А.С. ШОРОХОВ, А.А. ФЕДЯНИН  
*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ОПТИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛОВ С ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ**

В работе была построена мультифизическая модель электрического многоуровневого переключения элементов оптической памяти на основе различных материалов с фазовым переходом. В частности, были рассмотрены: поглощающая плёнка  $Ge_2Sb_2Te_5$ , преобразователь волноводных мод на основе  $Sb_2Se_3$ . С помощью полученной модели была рассчитана зависимость весового значения элементов памяти от напряжения программирования.

G.A. KOLOSOV, A.S. SHOROKHOV, A.A. FEDYANIN  
*Lomonosov Moscow State University*

## **NUMERICAL MODELING OF OPTICAL MEMORY ELEMENTS LEVERAGING PHASE-CHANGE MATERIALS**

A multiphysics model of electrical switching in optical memory elements based on various phase-change materials is constructed. In particular, the absorbing  $Ge_2Sb_2Te_5$  film and the  $Sb_2Se_3$ -based waveguide mode converter are considered. The dependence of the memory element weight on the programming voltage was estimated utilizing the obtained model.

Одним из наиболее перспективных подходов к реализации перестраиваемых оптических элементов на чипе является использование материалов с фазовым переходом (МФП), в частности халькогенидных стёкол: сплавов  $GeSbTe$  [1],  $Sb_2Se_3$  [2] и др. Материалы этого класса способны совершать обратимый переход из аморфного состояния в кристаллическое под действием нагрева, что сопровождается изменением оптических свойств среды. Кроме того, МФП способны сохранять своё фазовое состояние без внешнего энергоснабжения, что обеспечивает возможность создания энергонезависимых элементов оптической памяти.

Возможность многоуровневого программирования структур из МФП достигается промежуточным фазовым состоянием структуры. В рамках исследования оптических структур наиболее подходящим средством описания фазового перехода является метод эффективной среды [3].

В представленной работе исследовались две конфигурации элементов оптической памяти: поглощающая плёнка  $Ge_2Sb_2Te_5$  на кремниевом волноводе, преобразователь мод [4] на основе  $Sb_2Se_3$ , размещённый на многомодовом  $Si_3N_4$ -волноводе. Для электрического переключения элемента памяти использовался интегральный нагреватель [5] с импульсом напряжения длительностью 200 нс.

Расчёт мультифизической задачи фазового перехода проводился с помощью метода конечных элементов. Полученные данные использовались для расчёта оптического пропускания элементов памяти методом конечных разностей во временной области. Таким образом была получена зависимость пропускания структуры от напряжения программирования, представленная для плёнки  $Ge_2Sb_2Te_5$  на рис. 1. Энергия, необходимая для полной кристаллизации элемента памяти при этом составила 30 нДж.

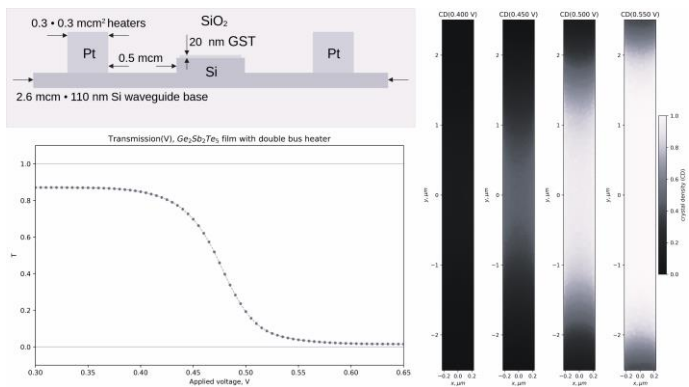


Рис. 1. Геометрия элемента памяти в виде  $Ge_2Sb_2Te_5$  плёнки в поперечном разрезе (слева сверху), зависимость пропускания элемента памяти от напряжения программирования (слева внизу), распределение плотности кристаллов в плёнке  $Ge_2Sb_2Te_5$  при различных приложенных к токовым шинам напряжениях (справа)

#### Список литературы

1. Orava J., et al. // Journal of Applied Physics. 2008. V. 104. No. 4.
2. Delaney M., et al. // Advanced functional materials. 2020. V. 30. No. 36. P. 2002447.
3. Woods Z., Gokirmak A. // IEEE Transactions on Electron Devices. 2017. V. 64. No. 11. P. 4466-4471.
4. Wu C., et al. // Nature communications. 2021. V. 12. No. 1. P. 96.
5. Erickson J. R. et al. // Optics Express. – 2022. – Т. 30. – №. 8. – С. 13673-13689.

А.С. КВИТКО, Г.А. КОЛОСОВ, А.С. ШОРОХОВ, А.А. ФЕДЯНИН  
*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ВЫСОКОДОБОРНЫХ РЕЗОНАТОРОВ НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛОВ С ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ**

В работе была построена и исследована модель оптического переключения высокодобротных резонаторов, использующих материалы с фазовым переходом. Было исследовано распространение тепла в исследуемых конфигурациях после оптического импульса нагрева, помимо этого, была исследована динамика и энергоэффективность переключения.

A.S. KVITKO, G.A. KOLOSOV, A.S. SHOROKHOV,  
A.A. FEDYANIN  
*Lomonosov Moscow State University*

## **NUMERICAL MODELING OF INTEGRATED HIGH-Q RESONATORS LEVERAGING PHASE-CHANGE MATERIALS**

This work involved the development and investigation of a model for optical switching of high-Q resonators leveraging phase-change material. The propagation of heat in the studied configurations following an optical pulse was investigated, along with the dynamics and energy efficiency of the programming process.

Активный интерес к интегральной реконфигурируемой фотонике обусловлен широкими перспективами её применения в таких областях, как квантовые и оптические вычисления, а также системы оптической коммутации.

Ключевым направлением в создании перестраиваемых компонентов на кристалле считается использование халькогенидных стёкол – материалов с фазовым переходом (МФП), таких как  $Ge_2Sb_2Te_5$  [1] и другие. При интеграции МФП в волноводы они могут служить активными компонентами для модуляции передаваемого света.

На рис. 1 представлены интегральные, полностью оптические и энергонезависимые модуляторы в двух различных геометрических вариациях – фотонные-кристаллические резонаторы на основе нанополостей и на основе нанотвердей [2] с поглощающей плёнкой  $Ge_2Sb_2Te_5$  по центру.

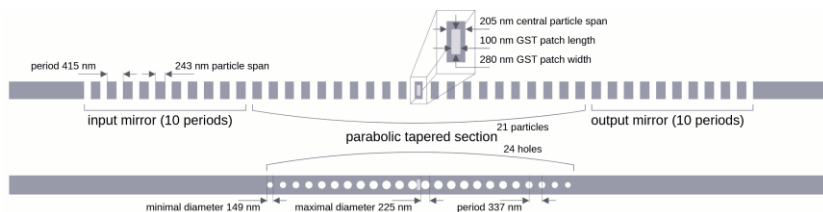


Рис. 1. Две различные конфигурации высокодобротных резонаторов с плёнкой  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$

Контролируя фазовое состояние МФП при помощи наносекундного лазерного импульса, можно изменять низкое значение пропускания волновода при доминирующей кристаллической фазе плёнки до высоких значений пропускания при доминирующей аморфной фазой, и наоборот.

Расчёт спектра и оптического поглощения в плёнке был выполнен методом конечных разностей во временной области. Расчёт фазового перехода проводился с использованием метода эффективной среды [3].

Важным критерием частоты программирования плёнки служит релаксация её температуры. В сравнении с обычным волноводом представленные конфигурации получились в 24 и 42 раза энергоэффективнее при записи и стирании памяти соответственно на резонансной частоте в С-диапазоне с её пропусканием 0,7 и добротностью  $\sim 7 \cdot 10^3$  для обеих структур.

Таким образом, была построена модель элементов оптической памяти в двух разных конфигурациях, была оценена их эффективность относительно стандартных волноводов, что открывает возможность их дальнейшей оптимизации с точки зрения энергоэффективности, точности и скорости переключения.

#### Список литературы

1. Orava J., et al. // Journal of Applied Physics. 2008. V. 104. No. 4.
2. Li E., et al. // Nano Letters. 2018. V. 18. No. 2. P. 1075-1081.
3. Woods Z., Gokirmak A. // IEEE Transactions on Electron Devices. 2017. V. 64. No. 11. P. 4466-4471.

Р. СИНГХ<sup>1</sup>, А.Е. ТЕРЕТЕНКОВ<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Независимый исследователь, Домодедово

<sup>2</sup>Математический институт им. В.А. Стеклова РАН, Москва

<sup>3</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ДЛИНЫ НЕЛИНЕЙНОГО КРИСТАЛЛА ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ СЦЕПЛЕННЫХ ФОТОННЫХ СОСТОЯНИЙ ПОДОБНЫХ КОТАМ ШРЕДИНГЕРА В ПРОЦЕССЕ СПОНТАННОГО ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РАССЕЯНИЯ**

В данной работе мы определяем оптимальную длину кристалла, необходимую для практической реализации сцепленных фотонных состояний, подобных коту Шредингера, в процессе спонтанного параметрического рассеяния. Мы выводим точные и приближенные аналитические формулы, которые непосредственно связывают параметры кристалла и накачки с оптимальной длиной взаимодействия. Полученные результаты предоставляют важный инструмент для расчёта оптимальной длины кристалла, что позволяет обеспечить практическую генерацию запутанных состояний, подобных состоянию кота Шредингера, в нелинейных средах с квадратичной нелинейностью ( $\chi^2$ ).

R. SINGH<sup>1</sup>, A.E. TERETENKOV<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Independent researcher, Domodedovo

<sup>2</sup>Steklov Mathematical Institute of the RAS, Moscow

<sup>3</sup>Lomonosov Moscow State University

## **CRYSTAL LENGTH OPTIMIZATION FOR SPONTANEOUS PARAMETRIC DOWN-CONVERSION GENERATED PHOTONIC ENTANGLED CAT-LIKE STATES**

In this work derives the optimal crystal length required for practical generation of photonic Schrodinger cat-like states in spontaneous parametric down-conversion. We present analytical and approximate formulas that link crystal and pump parameters directly to the optimal interaction length. These results provide a critical design tool for determining the optimal crystal length, enabling the practical generation of entangled cat states in  $\chi^2$  nonlinear media.

Многие перспективные квантовые технологии, такие как квантовая сенсорика и квантовые вычисления на непрерывных переменных, в значительной степени полагаются на возможность генерации и

управления неклассическими состояниями света. Особый интерес представляют состояния кота Шредингера – негауссовы состояния, представляющие собой квантовые суперпозиции макроскопически различных состояний, которые при этом обладают свойством квантовой сцепленности [1]. Эти состояния являются ключевым ресурсом для задач квантовой сенсорики и протоколов квантовой информации на непрерывных переменных.

В нашей предыдущей работе [1] мы предложили метод генерации сцепленных фотонных состояний, подобных коту Шредингера, в процессе спонтанного параметрического рассеяния (СПР). Однако для практической реализации этого метода критически важно определить оптимальные параметры эксперимента, и одним из ключевых среди них является длина нелинейного кристалла.

Таким образом, возникает фундаментальный вопрос: какова оптимальная длина кристалла, позволяющая оптимизировать неклассические свойства генерируемых сцепленных фотонных состояний, подобных коту Шредингера?

В данной работе мы даем ответ на этот вопрос. Мы представляем точные и приближенные аналитические формулы, которые непосредственно связывают параметры кристалла (нелинейная восприимчивость, показатель преломления) и накачки (длина волны, мощность) с оптимальной длиной взаимодействия. Определена оптимальная длина кристалла для максимизации амплитуды состояний, подобных коту Шредингера.

Наш результат можно применить для развития квантовых технологий на непрерывных переменных. Он потенциально позволяет ускорить практическую генерацию сцепленных состояний, подобных коту Шредингера, в нелинейных средах с  $\chi^2$ -нелинейностью, открывая путь к их использованию в квантовой сенсорике, а также в протоколах квантовой информации с непрерывными переменными.

#### *Список литературы*

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

В.К. ЕГОРОВ<sup>1</sup>, Е.В. ЕГОРОВ<sup>1,2</sup>, М.С. АФАНАСЬЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов  
РАН, Черноголовка*

<sup>2</sup>*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН*

## **ПРЯМОЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВО ВОЛНОВОДНО-РЕЗОНАНСНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕТА В ФАЙБЕРАХ**

Кратко описано явление полного внутреннего отражения света (ПВО). Экспериментально показано, что оно не способно описать распространения оптических потоков в волокнах в форме многократного последовательного ПВО, но адекватно представляет транспортировку таких потоков в форме их волноводно-резонансного распространения.

V.K. EGOROV<sup>1</sup>, E.V. EGOROV<sup>1,2</sup>, M.S. AFANAS'EV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Microelectronics Technology and High Purity Materials of the RAS,  
Chernogolovka*

<sup>2</sup>*Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS*

## **DIRECT PROOF OF LIGHT WAVEGUIDE-RESONANCE PROPAGATION IN FIBERS**

Short description of the light total internal reflection (TIR) phenomenon is presented. There is shown experimentally that the phenomenon in form of multiple TIR is not able to describe the optical fluxes propagation in fibers but its transportation can be explained adequately in the phenomenon form of light waveguide-resonance propagation.

Явление ПВО реализуется при падении оптических потоков на интерфейс между двумя диэлектрическими оптически прозрачными средами, если они до отражения распространялись в оптически более плотной среде ( $n_1 > n_2$ ) [1]. Явление характеризуется равенством углов падения и отражения и, в стационарном режиме, возникновением интерференционного поля за счёт взаимодействия падающего и отраженного потоков. В более плотной среде размер этого поля ограничен величиной, равной половине длины когерентности отражаемого излучения. В менее плотной среде размеры поля неограниченны, но его величина экспоненциально убывает по мере удаления от интерфейса.

Интенсивность при единичном ПВО уменьшается на  $\Delta I \sim I_0 \cdot 10^{-8}$ . Данное явление в форме многократного ПВО принято считать ответственным за транспортировку света фиберами [2]. В то же время выполненные оценки показали, что концепция многократного ПВО с введением понятий «магических» углов и модовой структуры не дает адекватного описания высокой оптико-транспортной эффективности файберов. Сделанные модельные представления дали основание полагать, что свет транспортируется фиберами в соответствии с механизмом волноводно-резонансного распространения [3]. В работе представлено прямое экспериментальное доказательство справедливости этого предположения. Простейшим примером фибера является плоская протяженная стеклянная пластина. На рис. 1 представлен набор ожидаемых линий зависимости интенсивности прохождения потока света в предположении стандартной модовой структуры (для трёх мод) от угла падения потока и такая зависимость при отсутствии мод. На рис. 2 представлена экспериментально полученная зависимость прохождения потока от угла падения на торец пластины. Полученные данные позволяют утверждать, что свет транспортируется фиберами в соответствии с механизмом его волноводно-резонансного распространения.

Работа выполнялась в рамках государственного задания Российской Федерации № 075-00295-25-00.

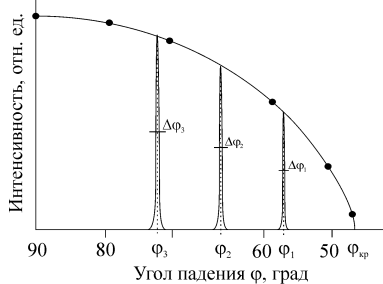


Рис. 1. Ожидаемая интенсивность на выходе фибера при наличии и отсутствии модовой структуры при варьировании угла падения



Рис. 2. Интенсивность на выходе фибера при варьировании угла падения света ( $\lambda_0 = 532$  нм) на его входной торец, полученная экспериментально

#### Список литературы

1. Харрик Н. Спектроскопия внутреннего отражения. М.: Мир, 1970.
2. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов. М.: Радио и связь, 1987.
3. Егоров Е.В., Егоров В.К. Волноводно-резонансное распространение радиационных потоков (явление радиационной сверхтекучести) и некоторые аспекты его проявления в реальности. М.: Физматлит, 2025.



В.С. ЦАРЕВ, Ф.О. МИЛОВИЧ<sup>1</sup>, А.Д. ПРЯМИКОВ,  
Г.К. АЛАГАСHEВ, А.Г. ОХРИМЧУК

*Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова ИОФ РАН, Москва*  
*<sup>1</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,  
Москва*

## **ПРЯМАЯ ЛАЗЕРНАЯ ЗАПИСЬ АНИЗОТРОПНЫХ НАНОСТРУКТУР В КВАРЦЕВОМ СТЕКЛЕ ОДИНОЧНЫМИ ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ**

Исследован режим прямой лазерной записи, при котором одиночный линейно поляризованный ультракороткий импульс, сфокусированный в объёме кварцевого стекла, формирует анизотропную структурную модификацию субмикронного размера. Установлено, что такая структура характеризуется двулучепреломлением, ориентация оптической оси которого совпадает с плоскостью поляризации падающего излучения.

V.S. TSAREV, F.O. MILOVICH<sup>1</sup>, A.D. PRYAMIKOV,  
G.K. ALAGASHEV, A.G. OKHRIMCHUK

*Dianov Fiber Optics Research Center of Prokhorov General Physics Institute of the RAS,  
Moscow*

*<sup>1</sup>National Research Technological University MISIS, Moscow*

## **DIRECT LASER WRITING OF ANISOTROPIC NANOSTRUCTURES IN FUSED SILICA WITH SINGLE FEMTOSECOND PULSES**

This study investigates a direct laser writing regime in which a single linearly polarized ultrashort pulse, focused inside fused silica, produces a submicron-sized anisotropic structural modification. It is established that this structure exhibits birefringence, with its optical axis orientation coinciding with the polarization plane of the incident beam.

Прямая лазерная запись анизотропных нано- и микроструктур - перспективный метод создания оптических фазовых элементов управления поляризациями светового поля, генерации пучков с орбитальным угловым моментом (ОАМ), а также формирования радиально- и азимутально-поляризованных мод [1]. Последние исследования демонстрируют возможность формирования трёхмерных фазовых элементов с заданными характеристиками [2]. Анизотропия

таких структур обусловлена образованием самоорганизующихся нанорешёток (тип II), либо наноразмерных сплюснутых пор внутри кварцевого стекла (тип X). Запись таких структур осуществляется ультракороткими импульсами с частотой следования не более 500 кГц, что связано с необходимостью минимизации тепловых эффектов, препятствующих формированию двулучепреломления. В данной работе рассматривается альтернативный и более быстрый механизм формирования оптической анизотропии в кварцевом стекле – для него достаточно в одиночного линейно-поляризованного сверхкороткого импульса. Из литературы известно [3], что в условиях жёсткой фокусировки Гауссова пучка векторный характер электромагнитного поля приводит к возникновению значительной продольной компоненты, нарушающей аксиальную симметрию распределения поля в перетяжке.

Исследовано взаимодействие одиночных сверхкоротких лазерных импульсов с кварцевым стеклом. Показано, что при жёсткой фокусировке ( $NA = 0.85$ ) оно приводит к формированию двулучепреломляющих наноструктур. Эксперименты проводились фемтосекундными импульсами (1030 нм, 280 фс) с линейной поляризацией. Фокусировка в объёме образца на глубине 10 мкм осуществлялась объективами с  $NA = 0.65$  и  $0.85$ . Изучались наноструктуры, записанные при четырёх ориентациях поляризации и энергиях импульса 20 - 60 нДж. Псевдоцветные изображения (рис. 1) демонстрируют зависимость морфологии модификаций как от энергии, так и от направления поляризации излучения.

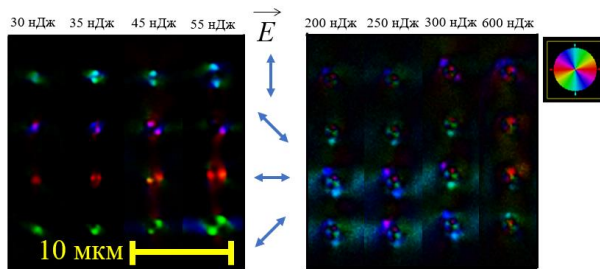


Рис. 1. Псевдоцветная карта распределения двулучепреломления вокселей сформированных при использовании  $NA = 0.85$  (слева),  $NA = 0.65$  (справа)

#### Список литературы

1. Beresna M., et al. // Opt. Mater. Express. 2011. V. 1. P. 783-795.
2. Chavilkadan M., et al. // APL Photonics. 2025. V. 10 (4).
3. Török P., et al. // J. Opt. Soc. Am. A. 1995. V. 12. P. 325-332.

И.О. БАТУЕВ, К.А. СМІРНОВ, Т.В. МУРЗИНА,  
А.И. МАЙДЫКОВСКИЙ

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

## **РОЛЬ ПОДЛОЖКИ В ФУНКЦИОНИРОВАНИИ ВОЛНОВОДНЫХ СТРУКТУР, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ ДВУХФОТОННОЙ ЛАЗЕРНОЙ ЛИТОГРАФИИ**

Методом двухфотонной лазерной литографии на подложках с разным показателем преломления изготовлены волноводы с адаптерами ввода-вывода излучения на основе полного внутреннего отражения. Численные расчёты показали, что в случае подложки  $\text{MgF}_2$  с показателем преломления  $n = 1,37$  пропускание волновода возрастает более чем в два раза по сравнению с аналогичным на подложке из оксида кремния ( $n = 1,52$ ). Данный результат подтверждается экспериментальными результатами.

I.O. BATUEV, K.A. SMIRNOV, T.V. MURZINA,  
A.I. MAYDYKOVSKY

*Lomonosov Moscow State University*

## **THE ROLE OF SUBSTRATE IN FUNCTIONING OF WAVEGUIDE STRUCTURES MANUFACTURED BY TWO-PHOTON LASER LITHOGRAPHY**

Waveguide structures with total internal reflection couplers were fabricated via two-photon lithography on substrates with different refraction indices. Numerical modeling shows that transmission of such structures increases more than twofold on  $\text{MgF}_2$  substrates ( $n = 1.37$ ) compared to same structures on silicon oxide ( $n = 1.52$ ) substrates. Experimental measurements confirm this result.

Двухфотонная лазерная литография (ДФЛЛ) представляет собой перспективный метод изготовления фотонных устройств благодаря ряду ключевых преимуществ: возможности создания структур с произвольной трёхмерной геометрией и допирования фоторезиста для целенаправленной модификации его свойств, а также высокому пространственному разрешению, превышающему дифракционный предел для используемой при печати длины волны. С помощью данной технологии были изготовлены волноводы, резонаторы, трёхмерные фотонные кристаллы и другие устройства фотоники [1, 2]. Большую роль в функционировании таких устройств, в первую очередь волноводов,

играет контраст показателей преломления материалов волновода и подложки ( $\Delta n$ ). Однако показатель преломления фоторезистов, широко используемых в ДФЛЛ, в видимом диапазоне составляет от 1.52 до 1.59, что при использовании стандартных стеклянных подложек обеспечивает ограниченный контраст до 0.07. В связи с этим развитие технологии ДФЛЛ для печати структур с большой величиной  $\Delta n$  является актуальной задачей. Поскольку увеличение показателя преломления фоторезиста сопряжено со значительными трудностями, представляющим значительный интерес направлением является применение подложек с низким показателем преломления.

В данной работе проведено численное и экспериментальное исследование спектральных характеристик фотонных устройств, состоящих из волновода и элементов ввода-вывода излучения на подложках с показателем преломления от 1,37 до 1,52 в видимом диапазоне. На рис. 1 представлены рассчитанные спектры пропускания для волноводов на подложках из плавленного кварца и фторида магния. Аналогичные структуры, состоящие из элементов ввода-вывода и соединяющих их волноводов, были изготовлены методом фемтосекундной ДФЛЛ на подложке  $\text{MgF}_2$ ; их СЭМ-изображения приведены на рис. 2. Измеренные спектры пропускания в диапазоне длин волн 700 - 1000 нм находятся в хорошем согласии с расчётными.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 24-42-02009.

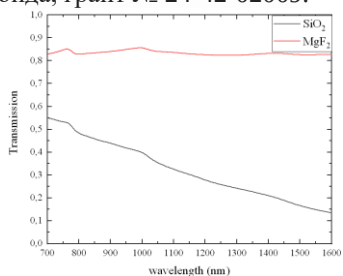


Рис. 1. Расчётные спектры пропускания волноводов с сечением 3 x 3 мкм и длиной 40 мкм на подложке из оксида кремния (черный) и фторида магния (красный)

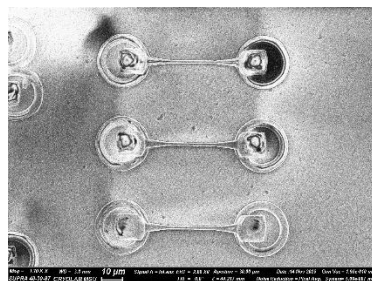


Рис. 2. СЭМ-изображение устройств, состоящих из волновода и элементов ввода-вывода излучения на подложке из  $\text{MgF}_2$

#### Список литературы

1. Wang H., et al. // Advanced Functional Materials. 2023. V. 33. No. 39. P. 2214211.
2. Batuev I.O., et al. // Moscow University Physics Bulletin. 2025. V. 80. No. 3. P. 529-536.

Р.С. ЧЕТВЕРИН, М.И. ШАРИПОВА, А.А. ФЕДЯНИН  
*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

## **ИЗГОТОВЛЕНИЕ АХРОМАТИЧЕСКИХ ДИФРАКЦИОННЫХ ЛИНЗ МЕТОДОМ ДВУХФОТОННОЙ ЛАЗЕРНОЙ ЛИТОГРАФИИ**

В этой работе проводилось численное моделирование, изготовление методом двухфотонной литографии и экспериментальная проверка оптических свойств дифракционных линз с увеличенной глубиной резкости, а также их сравнение с обычными френелевскими линзами. Увеличенная глубина резкости достигается благодаря добавлению к гиперболическому профилю френелевской линзы кубической нелинейности. Было показано, что такие линзы имеют широкий диапазон ахроматической фокусировки в видимой области.

R.S. CHETVERIN, M.I. SHARIPOVA, A.A. FEDYANIN  
*Lomonosov Moscow State University*

## **MANUFACTURING ACHROMATIC DIFFRACTIVE LENSES BY TWO-PHOTON LASER LITHOGRAPHY**

We performed numerical simulations, fabrication by two-photon lithography, and experimental investigation of the optical properties of diffractive lenses with extended depth of focus, along with its comparison to conventional Fresnel lenses. The extended depth of focus is achieved by adding a cubic nonlinearity to the hyperbolic profile of a Fresnel lens. It was shown that such lenses exhibit a broad range of achromatic focusing in the visible region.

Среди микроразмерных оптических элементов особый интерес представляют дифракционные оптические элементы (ДОЭ). Возможность задать произвольный амплитудный или фазовый профиль, а также компактность ДОЭ делают возможным использовать их в широком спектре приложений. Примером фокусирующего дифракционного оптического элемента является линза Френеля, состоящая из концентрических колец с непрерывно изменяющейся высотой. Такие элементы могут иметь высоту менее длины волны либо сравнимую с ней. Однако дифракционные линзы подвержены хроматическим aberrациям, выражающимися в сильной зависимости фокусного расстояния от длины волны. Эти хроматические aberrации связаны со скачками фазового профиля на границах зон [1]. Одним из способов коррекции

хроматических aberrаций является увеличение глубины резкости системы. Когда глубина резкости велика, изображение остаётся достаточно резким на большом расстоянии вдоль оптической оси для каждой спектральной компоненты. Это приводит к частичному перекрытию областей фокусировки света разных цветов и снижает заметность продольной хроматической aberrации, что улучшает цветовую однородность и общее качество изображения без сложной оптической коррекции. Ранее такой подход был реализован при изготовлении дифракционных линз методом электронно-лучевой литографии [2].

Целью настоящей работы является изготовление микроразмерных дифракционных линз для оптического диапазона с увеличенной глубиной резкости и их экспериментальная оптическая характеристика.

Методом двухфотонной литографии из фотополимерного резиста SZ-2080 были изготовлены два образца: обычная френелевская линза с гиперболическим фазовым профилем и линза, в которой к гиперболическим фазовым профилем с добавлением кубической нелинейности (рис. 1). Для обеих линз были выбраны следующие характеристики: апертура – 100 мкм, центральная длина волны – 500 нм, заданное фокусное расстояние – 100 мкм, толщина – 1 мкм.

Измерения проводились с использованием лазерного источника суперконтинуума в диапазоне от 525 до 700 нм. Было показано, что изготовленная линза обеспечивает ахроматическую фокусировку в диапазоне от 550 до 675 нм на расстоянии около 66 мкм (рис. 2).

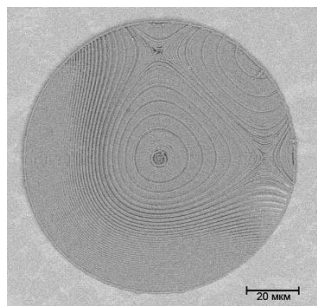


Рис. 1. Изображение СЭМ изготовленной ахроматической линзы

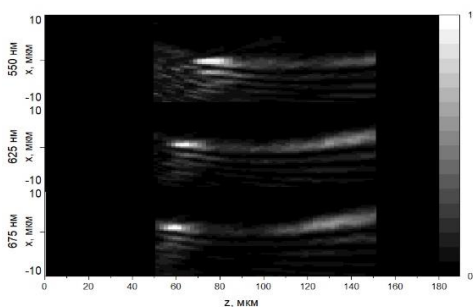


Рис. 2. Фокусировка изготовленных дифракционных линз на трёх длинах волн: 550, 625 и 675 нм

#### Список литературы

1. Arbabi E., et al. // Optica. 2016. V. 3. P. 628-633.
2. Colburn S., et al. // Sci. Adv. 2018. V. 4.

В.А. ЛЮБОШЕНКО<sup>1</sup>, Д.А. ЕЛХИМОВ<sup>1,2</sup>, О.А. ЗАЯКИН<sup>2</sup>,  
С.П. КОТОВА<sup>2,3</sup>, М.Н. МАМЗИКОВ<sup>1</sup>, А.И. ПОНОМАРЕВ<sup>2,3</sup>,  
Т.Н. САПЦИНА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (филиал),  
Саров, Нижегородская обл.

<sup>2</sup>Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

<sup>3</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева

## **ВОССТАНОВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КЛАСТЕРОВ ОПТИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ДИСТИЛЛИРОВАННОЙ ВОДЕ МЕТОДАМИ МАЛОУГЛОВОГО СВЕТОРАССЕЯНИЯ**

Приведены результаты восстановления характеристик кластеров оптических неоднородностей в дистиллированной воде методом аппроксимации экспериментальных данных малоуглового светорассеяния с учётом влияния внутри кластерной интерференции света. Были получены характерные размеры частиц внутри кластера, показатель преломления неоднородностей и геометрическая структура кластера.

V.A. LYUBOSHENKO<sup>1</sup>, D.A. ELKHIMOV<sup>1,2</sup>, O.A. ZAYAKIN<sup>2</sup>,  
S.P. KOTOVA<sup>2,3</sup>, M.N. MAMZIKOV<sup>1</sup>, A.I. PONOMAREV<sup>2,3</sup>,  
T.N. SAPTSINA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sarov Branch of Lomonosov Moscow State University, Nizhny Novgorod region

<sup>2</sup>Samara Branch of Lebedev Physical Institute of the RAS

<sup>3</sup>Samara National Research University

## **RESTORATION OF THE CHARACTERISTICS OF CLUSTERS OF OPTICAL INHOMOGENEITIES IN DISTILLED WATER BY SMALL-ANGLE LIGHT SCATTERING METHODS**

The results of reconstructing the characteristics of clusters of optical inhomogeneities in distilled water by approximating experimental data from low-angle light scattering, taking into account the influence of intra-cluster interference, are presented. The characteristic particle sizes within the cluster, the refractive index of the inhomogeneities, and the geometric structure of the cluster were obtained.

В рамках проекта по созданию оптического датчика по контролю воды в свободном топливе была зафиксирована немонотонность сигнала рассеяния в зависимости от концентрации в модельных средах [1, 2].

Такая немонотонность возникает на малых углах и при малых концентрациях дисперсной фазы, что может быть объяснено эффектом вторичного рассеяния на частицах дисперсной фазы света, первично рассеянного на оптических неоднородностях среды [2]. По аналогии такие неоднородности можно рассматривать в качестве кластеров бабстонов [3]. Структура кластеров полагается фрактальной на основании гипотезы о пространственной корреляции дисперсной фазы [4].

В данной работе предлагается метод восстановления характеристик целевых кластеров посредством решения системы из нелинейных уравнений относительно интересующих параметров, описывающихся следующим выражением:

$$I_{exp}(\theta_i) = I_{total}(\theta_i, \lambda) = N_q \cdot N_s \cdot \int_0^{\infty} P(a, a_0, \delta_a) |E(a, \theta_i, \lambda, n)|^2 da + \\ + N_q \cdot N_s^2 \cdot \left| \int_0^{\infty} P(a, a_0, \delta_a) E(a, \theta_i, \lambda, n) da \right|^2 \cdot \left| \int_0^{\infty} 4\pi r^2 p(r, r_0, \delta_r) \frac{\sin(qr)}{qr} dr \right|^2,$$

где  $I_{exp}(\theta_i)$  – экспериментальная интенсивность света на определённом угле рассеяния;  $P(a, a_0, \delta_a)$  – распределение частиц по размерам внутри кластера;  $E(a, \theta_i, \lambda, n)$  – поле рассеянного света на основе мультипольного разложения Ми;  $p(r, r_0, \delta_r)$  – радиальное распределение частиц внутри кластера;  $N_q$  и  $N_s$  – количество кластеров и частиц в каждом кластере соответственно.

В ходе анализов портретов рассеяния удалось выяснить что: показатель преломления оптических неоднородностей  $n \approx 1.332 + 0.01i$  и отличен от показателя преломления воды в четвёртом знаке. Средний размер частиц в кластере  $a_0 \approx 100$  нм и стандартное отклонение логарифмически нормального распределения частиц по размерам  $\delta_a \approx 2.25$ .

#### Список литературы

1. Ponomarev A.I., Zayakin O.A., Kotova S.P., et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86 (12). P. 1438.
2. Lyuboshenko V.A., Elkhimov D.A., Zayakin O.A., et al. // Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 2025. V. 52, No. 6. P. S657.
3. Bunkin N.F., Lobeev A.V. // Quantum Electronics. 1994. V. 24 (4). P. 319-323.
4. Шибанов Е.Б. // Морской гидрофизический журнал. 2008 (2). С. 46.



Г.А. ФИЛОХИН<sup>1,2</sup>, Н.В. КОВАЛЕНКО<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный*

<sup>2</sup>*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН*

## **ПОСТРОЕНИЕ ПРЕДСКАЗАТЕЛЬНОЙ МОДЕЛИ МОРФОЛОГИИ ЛАЗЕРНЫХ АБЛЯЦИОННЫХ КОЛОНОК В БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЯХ НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**

Приведены результаты построения предсказательной модели морфологии абляционных колонок на основе методов машинного обучения, показавшая высокую эффективность в исследуемых диапазонах параметров оптического излучения. Разработана и автоматизирована лабораторная установка для формирования абляционных колонок в образцах и последующего определения их размеров с использованием алгоритмов обработки изображений.

G.A. FILOKHIN<sup>1,2</sup>, N.V. KOVALENKO<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny*

<sup>2</sup>*Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS*

## **BUILDING A PREDICTIVE MODEL OF THE MORPHOLOGY OF LASER ABLATION COLUMNS IN BIOLOGICAL TISSUES BASED ON MACHINE LEARNING**

Presents the results of constructing a predictive model of the morphology of ablative columns based on machine learning methods, which showed high efficiency in the studied ranges of optical radiation parameters, are presented. A laboratory facility has been developed and automated for forming ablation columns in samples and then determining their sizes using image processing algorithms.

Воздействие высокоинтенсивного лазерного излучения приводит к абляции биологической ткани и может быть использовано, например, в хирургии [1] и косметологии [2] для локального воздействия с минимальным повреждением окружающих здоровых тканей. При этом оптимальные форма и размеры абляционных колонок отличаются для разных типов проводимых операций и являются определяющими свойствами для эффективности лечения.

В данной работе предлагается использовать методы машинного обучения для построения модели, предсказывающей глубину и диаметр абляционных колонок при известных параметрах лазерного излучения: мощности импульса и его длительности.

На рис. 1 представлена установка для сбора данных. В качестве физической модели ткани было выбрано желатиновое желе концентрацией 40 грамм на литр. Образцы облучались одиночными импульсами из тулиевого лазера (ТЛ) с длиной волны 1942 нм, расположенном вертикально на расстоянии 0,5 мм от поверхности образца. Визуализация колонок на экране проводилась с помощью метода Шлирена. Для его реализации был использован оранжевый лазер (ОЛ) с длиной волны 589 нм. На рис. 2 представлен результат визуализации колонок, созданных при мощности импульса 5 Вт и длительности 0,3 мс. На основе изображений на экране были определены глубины  $H$  и диаметры  $D$  абляционных колонок для различных мощностей  $P$  (2,5, 3,5, 4,5, 5,0 Вт) и длительностей импульса  $t$  (0,1, 0,2, 0,3 мс) лазерного излучения.

В качестве модели был выбран метод линейной регрессии, описываемый уравнениями:  $a_1 * P + b_1 * t + c_1 * E + d_1 = H$  и  $a_2 * P + b_2 * t + c_2 * E + d_2 = D$ , где  $E = P * t$ ,  $a, b, c, d$  – веса модели, получаемые в процессе обучения. Обучали модель на 90 % экспериментальных данных. Качество модели определяли на оставшихся 10 % данных. Ошибка составила 14 % при предсказании глубины колонки и 8 % при предсказании её диаметра. Данная модель может быть применена к задаче дозиметрии и позволит существенно облегчить разработку лазерных приборов и подбор режимов их работы.

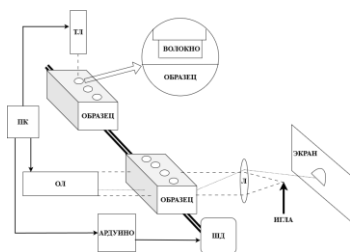


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

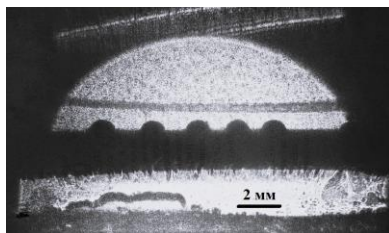


Рис. 2. Визуализация колонок методом Шлирена

#### Список литературы

1. Schena E., et.al. // Journal of functional biomaterials. 2017. V. 8. No. 2. P. 19.
2. Jih M.H., et al. // Seminars in cutaneous medicine and surgery. 2008. V. 27. No. 1. P. 63-71.

А.А. КРИВЕЦКАЯ<sup>1,2,3</sup>, Т.А. САВЕЛЬЕВА<sup>1,2</sup>, Д.М. КУСТОВ<sup>1</sup>,  
В.В. ЛЕВКИН<sup>4</sup>, И.Д. РОМАНИШКИН<sup>1</sup>, С.С. ХАРНАС<sup>4</sup>,  
В.Б. ЛОЩЕНОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

<sup>3</sup>*Городская клиническая больница им. С.С. Юдина, Москва*

<sup>4</sup>*Первый Московский государственный медицинский университет  
им. И.М. Сеченова*

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ EX VIVO НА ОСНОВЕ ОБРАТНОГО МЕТОДА УДВОЕНИЯ-ДОБАВЛЕНИЯ**

Приведены результаты разработки метода определения оптических свойств биологических образцов и его апробация на оптических фантомах и тканях органов желудочно-кишечного тракта, а также сопоставление с эталонным методом, при котором спектральные данные регистрируются с использованием интегрирующей сферы.

А.А. KRIVETSKAYA<sup>1,2,3</sup>, Т.А. SAVELIEVA<sup>1,2</sup>, S.S. KHARNAS<sup>4</sup>,  
D.M. KUSTOV<sup>1</sup>, V.V. LEVKIN<sup>4</sup>, I.D. ROMANISHKIN<sup>1</sup>,  
V.B. LOSCHENOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*

<sup>2</sup>*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)*

<sup>3</sup>*S.S. Yudin City Clinical Hospital, Moscow*

<sup>4</sup>*Sechenov First Moscow State Medical University*

## **DEVELOPMENT OF THE METHOD FOR THE DETERMINATION OF THE BIOLOGICAL TISSUES OPTICAL PROPERTIES EX VIVO BASED ON THE INVERSE ADDING-DOUBLING TECHNIQUE**

The results of the development of the method for determining the optical properties of biological samples and its approbation in optical phantoms and tissues of the gastrointestinal tract are presented, as well as a correlation with the reference method in which spectral data are recorded using an integral sphere.

Оптические свойства биологических тканей, такие как коэффициенты поглощения и рассеяния, а также фактор анизотропии, определяют

закономерности распространения света в исследуемых объектах. Информация об оптических свойствах органов позволит адаптировать параметры воздействия оптического излучения во время проведения лазерноиндуцированной терапии для каждого клинического случая.

Апробация методики оценки оптических свойств проводилась на оптических фантомах, состоящих из жировой эмульсии (Интралипида), имитирующей рассеивающие свойства, эритроцитарной массы, имитирующей поглощающие свойства, желатина для создания твердотельной матрицы и физиологического раствора в качестве растворителя. Также были проведены исследования образцов тканей желудочно-кишечного тракта, разделённых на слизисто-подслизистый и мышечно-серозный слои.

Регистрация спектральных данных осуществлялась при помощи спектрофотометра с интегрирующей сферой «Hitachi U-3400» и спектрометра с оптоволоконным входом «ЛЭСА-01-БИОСПЕК». Измерения проводились в двух геометриях: диффузного отражения и пропускания для возможности восстановления коэффициента поглощения и редуцированного коэффициента рассеяния, который выражается через коэффициент рассеяния и фактор анизотропии.

По результатам проведённого исследования был разработан метод на основе обратного метода удвоения-добавления, начальные значения оптических свойств для которого определялись при помощи модифицированного метода Кубелки–Мунка. Были определены значения коэффициента поглощения и редуцированного коэффициента рассеяния в диапазоне 400 - 600 нм для образцов желудка и тонкой кишки.

Разработанная методика оценки оптических свойств на основе обратного метода удвоения-добавления позволяет восстанавливать коэффициент поглощения и редуцированный коэффициент рассеяния биологических тканей из спектральных данных. В дальнейшем планируется корректировка метода для возможности определения оптических свойств в клинических условиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 25-25-00516.

В.К. УРЮПИНА<sup>1,2</sup>, Н.А. ГОРБУНОВ<sup>1,3</sup>, С.П. КОТОВА<sup>1,2</sup>,  
Н.Н. ЛОСЕВСКИЙ<sup>1</sup>, А.М. МАЙОРОВА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

<sup>2</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева

<sup>3</sup>Медицинский университет «Реавиз», Самара

## **ОПТОТЕРМИЧЕСКОЕ МАНИПУЛИРОВАНИЕ ПОЛИСТИРОЛОВЫМИ МИКРОСФЕРАМИ С КЛЕТКАМИ ПОЧЕК ПРИ ПОНИЖЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ**

Приводятся результаты экспериментов по оптотермическому захвату полистироловых микросфер с нанесёнными клетками почек в охлаждаемой кювете с температурой охлаждения 8 °С. Понижение температуры направлено на уменьшение негативного влияния лазерного излучения на биологические объекты в процессе манипулирования.

V.K. URYUPINA<sup>1,2</sup>, N.A. GORBUNOV<sup>1,3</sup>, S.P. KOTOVA<sup>1,2</sup>,  
N.N. LOSEVSKY<sup>1</sup>, A.M. MAYOROVA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara Branch of Lebedev Physical Institute of the RAS

<sup>2</sup>Samara National Research University

<sup>3</sup>Reaviz Medical University, Samara

## **OPTOTHERMAL MANIPULATION OF POLYSTYRENE MICROSPHERES WITH KIDNEY CELLS AT LOW TEMPERATURE**

The results of experiments on the optothermal capture of polystyrene microspheres with deposited kidney cells in a cooled cell with a cooling temperature of 8 °C. Lowering the temperature is aimed at reducing the negative effect of laser radiation on biological objects during manipulation.

В оптотермических ловушках объекты захватываются и перемещаются конвекционными потоками посредством образования локальных градиентов температуры при поглощении [1]. Оптотермические ловушки имеют ряд преимуществ (возможность захвата конвекционным потоком объектов различных форм и свойств с больших расстояний; создание областей с повышенной или пониженной концентрацией микрочастиц и другие). Однако, использование лазерного излучения ведет к повышению температуры в точке фокусировки, что может способствовать

повреждению исследуемых объектов, таких как клетки, ткани или полимеры.

Актуальными задачами являются исследование влияния воздействия лазерного излучения на биообъекты [2] и разработка методов снижения температуры в оптотермических ловушках [3]. Решение этих задач позволит расширить использование лазерных пинцетов в биологических исследованиях и медицинских приложениях [4]. Ранее авторы [5] предложили использовать охлаждаемую кювету и продемонстрировали возможности снижения температуры в области оптотермического манипулирования до 25 - 35 °С (вместо 40 - 50 °С для обычной кюветы). Эксперименты проводились с полистироловыми микросферами.

Цель настоящей работы исследовать эффективность манипулирования в этой кювете взвесью полистироловых микросфер (Alpha Nanotech Inc.) с нанесёнными на поверхность антигенами почек. Подобные объекты представляют интерес в качестве основы тест-систем для диагностики биосенсоров. Важно оценить влияние на антигены лазерного воздействия в процессе оптотермического манипулирования.

Для эффективного захвата одновременно большого количества объектов и оценки числа облученных микросфер использовалась кольцевая ловушка. С помощью жидкокристаллического пространственного модулятора света (ЖК ПМС) формировались кольца диаметром 15 мкм и толщиной 0,7 мкм. Мощность выходного лазерного излучения 120 мВт, время облучения захваченных микросфер 15 с, температура жидкости вне области фокусировки лазера не превышала 14 °С. Манипулирование проводилось непосредственно в транспортировочном контейнере, который помещался в охлаждаемую кювету. Химиико-биологическими методами сравнивались взвеси микросфер – необлучённая и после оптотермического манипулирования, помещённые в два одинаковых транспортировочных контейнерах

Дальнейшие разработки будут направлены на оптимизацию параметров охлаждения и улучшение точности позиционирования частиц.

#### *Список литературы*

1. Chen Z., Li J., Zheng Y. // Chemical reviews. 2021. V. 122. No. 3. P. 3122.
2. Ермолинский П.Б., Луговцов А.Е., Семенов А.Н. и др. // Квантовая электроника. 2022. Т. 52. № 1. С. 22-27.
3. Kollipara P.S., Li X., Li J., et al. // Nature Communications. 2023. V. 14 (1). P. 5133.
4. Sneh T., Corsetti S., Notaros M., et al. // Nat Commun. 2024. V. 15. P.8493.
5. Котова С.П., Лосевский Н.Н., Майорова А.М. и др. // Квантовая электроника. 2025. Т. 55. № 4. С. 224.

К.Н. БЕЛОВ<sup>1</sup>, А.Д. ГУЛЬМ<sup>1</sup>, М.Г. ИВАНОВ<sup>2</sup>, Н.Д. КУНДИКОВА<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Южно-Уральский государственный университет, Челябинск

<sup>2</sup>Институт электрофизики Уральского отделения РАН, Екатеринбург

## **ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ОПТИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ МЕТОДОМ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА**

Методом КР-картирования исследована микроструктура образцов оптической керамики (5 ат. % Yb:LuAG и 7 ат. % La:Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Визуализирована блочная структура поликристаллов. Определён средний размер кристаллитов (15 - 25 мкм) и выявлена неоднородность остаточных механических напряжений по объёму материала, что может влиять на его лучевую стойкость.

K.N. BELOV<sup>1</sup>, A.D. GULM<sup>1</sup>, M.G. IVANOV<sup>2</sup>, N.D. KUNDIKOVA<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>South Ural State University, Chelyabinsk

<sup>2</sup>Institute of Electrophysics of Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg

## **VISUALIZATION OF CERAMICS STRUCTURE BY RAMAN SCATTERING**

The microstructure of optical ceramic samples (5 at. % Yb:LuAG and 7 at. % La:Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) was studied using Raman mapping. The block structure of the polycrystals was visualized. The average crystallite size was determined (15 - 25 μm), and non-uniformity of residual mechanical stresses throughout the material was revealed, which may affect its radiation resistance.

Функциональные характеристики оптически прозрачных керамик (лазерных, сцинтилляционных, магнитооптических, защитных) определяются их микроструктурой [1, 2]. Контроль локальных дефектов, размеров кристаллитов и фазового состава требует методов с высоким пространственным разрешением. Комбинационное рассеяние света (КР-спектроскопия) позволяет проводить неразрушающий локальный анализ, а также пространственный анализ (КР-картирование) [3 - 5] с микронным разрешением, что делает его исключительно актуальным для исследования и корректировки технологии изготовления оптической керамики.

Целью работы – визуализировать микроструктуру образцов оптических керамик 5 ат. % Yb:LuAG и 7 ат. % La:Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> методом КР-картирования.

Спектры комбинационного рассеяния регистрировались на спектрометре комбинационного рассеяния ЗНЛ ИНТЕГРА СПЕКТРА в спектральном диапазоне 200 - 600  $\text{см}^{-1}$  на длине волны 633 нм.

Результаты КР-картирования исследуемых образцов представлены на рис. 1 и 2.

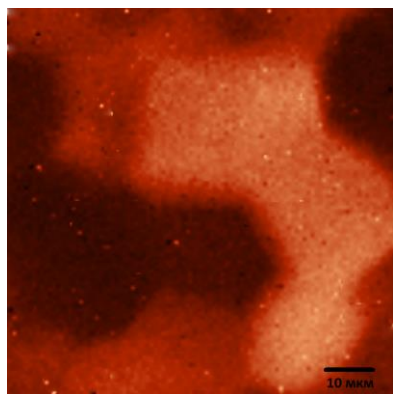


Рис. 1. КР-картирование образца  
5 at. % Yb:LuAG

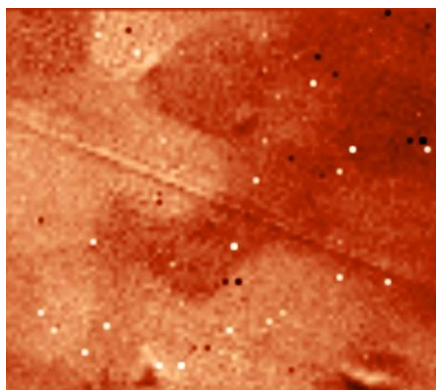


Рис. 2. КР-картирование образца  
7 at. % La:Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

На рис. 1 и 2 КР-картирование образцов отображает блочную структуру, что соответствует разным кристаллитам в поликристаллической структуре оптической керамики. Оценка среднего размера кристаллита для образца 5 at. % Yb:LuAG составляет около 15 - 20 км, для образца 7 at. % La:Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 20 - 25 мкм. Цветовой контраст блоков обусловлен изменениями параметров комбинационных линий (ширины и положения линии) в КР-спектрах разных кристаллитов. Это определяет неоднородность остаточных механических напряжений в кристаллитах, что может влиять лучевую стойкость образцов керамики.

#### *Список литературы*

1. Ikesue A., Aung Y.L., Wang J. // Progress in Quantum Electronics. 2022. V. 86. P. 457.
2. Tian F., Ikesue A., Li J. // J. of the European Ceramic Society. 2022. V. 42 (5). P. 1833-1851.
3. Gordon K.C., McGoverin C.M. // Int. J. of Pharmaceutics. 2011. V. 417. P. 151-162.
4. Sobhani Z., Amin M., Naidu R., et al. // Analytica Chimica Acta. 2019. V. 1017. P. 191-199.
5. Nowakowska A.M., Pieczara A., et al. // Analytical Chemistry. 2025. V. 97 (30). P. 16374.



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

## **ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОВМЕЩЕНИЯ МЕТОДОВ РАСЧЁТА СПЕКТРАЛЬНЫХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТНЫХ СРЕД**

Проведено исследование спектральных свойств композитных сред с золотыми наночастицами в форме эллипсоидов вращения и их смесей. Получены спектральные характеристики отражения, пропускания и поглощения данных структур при использовании совмещённых моделей эффективной среды. Выполнены расчёты спектральных свойств композитных сред с использованием нескольких совмещённых моделей, рассматривающих смесь золотых наночастиц с разной формой эллипсоида вращения, в объёмных отношениях, равных 1 : 3, 1 : 1 и 3 : 1. Проведён сравнительный анализ полученных результатов.

D.A. MURATOV, N.E. NIKOLAEV, T.K. CHEKHLOVA  
*Patrice Lumumba Peoples Friendship University of Russia, Moscow*

## **ADDITIONAL POSSIBILITIES OF COMBINING METHODS FOR CALCULATION OF SPECTRAL PROPERTIES OF COMPOSITE MEDIA**

A study of the spectral properties of composite media containing gold nanoparticles in the shape of ellipsoids of revolution and their mixtures was carried out. The spectral characteristics of the reflection, transmission, and absorption of these structures were obtained using modified effective media models. Calculations of the spectral properties of the composite media were performed using several coupled models considering a mixture of gold nanoparticles with different ellipsoid shapes, in volume ratios of 1 : 3, 1 : 1 and 3 : 1. A comparative analysis of the obtained results was performed.

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

В работе проведено исследование оптических свойств композитных сред с золотыми наночастицами в форме эллипсоидов вращения. При

расчёте свойств композитной среды использовались различные комбинации модели эффективной среды Максвелла–Гарнетта с моделями эффективной среды Бруггемана, Луенги и Максвелла–Гарнетта.

В работе получены выражения для коэффициентов отражения и пропускания композитных сред, содержащих золотые наночастицы одинаковой формы, а также смеси золотых наночастиц с различной формой эллипсоидов вращения, при объёмных соотношениях – 1 : 3, 1 : 1, 3 : 1. Расчёты спектральных характеристик сред проводились для случаев с общей концентрацией частиц в композите от 1 до 3 %.

Проведены расчёты спектральных характеристик показателей преломления и коэффициентов экстинкции, а также коэффициентов отражения, пропускания и поглощения композитных плёнок, содержащих золотые наночастицы разной формы и их смеси.

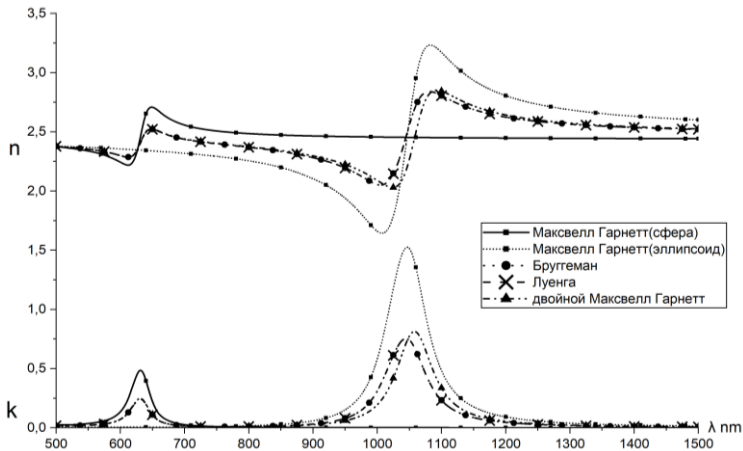


Рис. 1. Показатели преломления и коэффициенты экстинкции сред с золотыми наночастицами различной формы и их смесей

Расчёты показали (рис. 1), что разница между моделями Бруггемана и Луенги, совмещёнными с моделью эффективной среды Максвелла–Гарнетта почти отсутствует. Последовательное объединение двух моделей Максвелла–Гарнетта даёт двойственный результат, вследствие чего использование такого подхода нецелесообразно.

#### Список литературы

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

Ю.О. ПРОСОВСКИЙ, О.Ф. ПРОСОВСКИЙ, А.Н. ИСАМОВ,  
В.А. СМОЛЪЯНИНОВ, Г.В. СОЛОПОВ

*Обнинское научно-производственное предприятие «Технология» им. А.Г. Ромашина*

## **ПОЛУЧЕНИЕ РАВНОТОЛЩИННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ПЕРСПЕКТИВНЫМ МЕТОДОМ PARMS**

В работе представлен перспективный метод нанесения оптических покрытий – метод магнетронного распыления PARMS. При помощи разработанных теневых экранов получена высокая равномерность толщины покрытия на длине подложки 80 мм с погрешностью разброса не более 0,7 %.

Yu.O. PROSOVSKIY, O.F. PROSOVSKIY, A.N. ISAMOV,  
V.A. SMOL'YANINOV, G.V. SOLOPOV

*Obninsk Research and Production Enterprise Technologiya, Kaluga Region*

## **HIGH UNIFORMITY OPTICAL COATINGS PRODUCTION USING THE PARMS PERSPECTIVE MAGNETRON SPUTTERING METHOD**

In this paper, the promising magnetron sputtering method for producing thin film optical coatings – PARMS is shown. High uniformity coatings with the thickness difference less than 0.7 % at the length of the substrate equal to 80 mm with the help of special screens were obtained.

Одним из ключевых параметров, определяющих качество оптического покрытия является равномерность его толщины на поверхности подложки [1]. В прецизионных фильтрах, требования могут достигать обеспечения равномерности покрытия на уровне 0,5 - 1 % по длине подложки. Обеспечить столь высокую равномерность, на текущий момент, способны лишь методы ионного и магнетронного распыления. Так, например, немецкая установка с технологией PARMS Helios позволяет достичь равномерности на уровне 0,5 % по толщине подложки.

Разработанная в нашей научно-исследовательской лаборатории вакуумная напылительная установка с технологией PARMS, также способна удовлетворить заданным требованиям. Однако, для достижения заданной точности, необходимо использовать специальные экраны, поскольку одним из ключевых факторов, приводящих к разнотолщинности покрытия при нанесении на вращающуюся подложку является разная угловая скорость в центре и на краю подложкодержателя [2].

Для обеспечения равномерности толщины наносимых покрытий, был проведён ряд экспериментов на вакуумной напылительной установке с технологией PARMS. Образец делился на четыре зоны (от края к центру), каждая из которых анализировалась в САПР OptiLayer. По результатам анализа определялась толщина оптического покрытия в каждой точке.

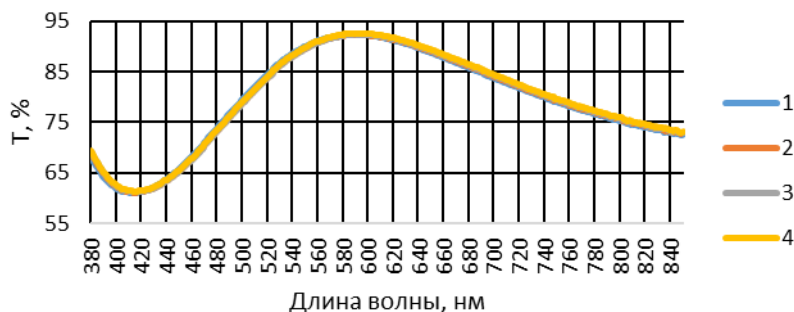


Рис. 1. Спектральные коэффициенты пропускания различных образцов от края (№1) к центру (№ 4), полученные толщины для каждого из образцов: № 1 – 126,9 нм, № 2 – 127,6 нм, № 3 – 127,9 нм, № 4 – 128 нм

Как можно видеть из рис. 1, разработанные специальные экраны, обеспечили высокую равномерность оптического покрытия по толщине на уровне не более 0,7 % на длине подложки 80 мм. Полученные значения практически не уступают существующим зарубежным аналогам ведущих мировых производителей (Helios) и позволяют в обозримом будущем обеспечить производство прецизионных интерференционных светофильтров с крайне высокой равномерностью покрытия по толщине.

#### Список литературы

1. Касинский Н.К., Томаль В.С., Демидович Т.И., Петлицкая Я.В. Получение равномерных по толщине вакуумных металлодиэлектрических покрытий на крупногабаритных оптических деталях, диаметр которых соизмерим с размером вакуумной камеры // Доклады БГУИР. 2012. № 3 (65). С. 63-65.
2. Котликов Е.Н., Иванов В.А., Прокашев В.Н., Тропин А.Н. Оптимизация оснастки вакуумной камеры при изготовлении оптических покрытий. // Научное приборостроение. 2010. Т. 20. № 1. С. 59-64.

И.Ю. ФАНДИЕНКО<sup>1,2</sup>, Г.Н. ВИШНЯКОВ<sup>1</sup>, В.Л. МИНАЕВ<sup>1</sup>,  
Е.В. ШУМСКИЙ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Всероссийский научно-исследовательский институт  
оптико-физических измерений, Москва*

<sup>2</sup>*ООО «Электростекло», Москва*

## **ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ЭТАЛОННЫХ ЗЕРКАЛ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ АБЕРРАЦИЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО МИКРОСКОПА**

Работа посвящена повышению точности измерений микрорельефа поверхности с помощью интерференционного микроскопа за счёт коррекции аберраций оптической системы с использованием жидкого эталонного зеркала. Показано, что жидкое зеркало обладает высокой степенью плоскостности и низкой шероховатостью, обеспечивая меньшие значения погрешности по сравнению с традиционным стеклянным эталонным зеркалом. Вычитание фазового изображения жидкого зеркала из измерений позволяет существенно улучшить точность восстановления микропрофиля поверхности.

I.Yu. FANDIENKO<sup>1,2</sup>, G.N. VISHNYAKOV<sup>1</sup>, V.L. MINAEV<sup>1</sup>,  
E.V. SHUMSKIY<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*All-Russian Scientific Research Institute for Optical and Physical Measurements,  
Moscow*

<sup>2</sup>*Elektrosteklo LLC, Moscow*

## **EXPERIENCE OF USING REFERENCE MIRRORS TO CORRECT ABERRATIONS IN THE OPTICAL SYSTEM OF AN INTERFERENCE MICROSCOPE**

This work is devoted to improving the accuracy of surface microrelief measurements using an interference microscope by correcting optical system aberrations using a liquid reference mirror. It was shown that the liquid mirror possesses a high degree of flatness and low roughness, resulting in lower errors compared to a traditional glass reference mirror. Subtracting the phase image of the liquid mirror from the measurements significantly improves the accuracy of surface microprofile reconstruction.

Интерференционная микроскопия широко применяется для исследования микроструктур, обеспечивая высокую чувствительность к изменениям оптической разности хода. В фазовое изображение вносят вклад не только волновой фронт излучения, отраженного от объекта, но и

абберации оптической системы микроскопа, включая несовершенство зеркала опорного канала [1].

Одним из перспективных подходов к устранению этих aberrаций является использование эталонных зеркал. Такие зеркала применяют вместо объекта в процессе калибровки микроскопа. Фазовое изображение эталонного зеркала записывается в памяти компьютера для последующего вычитания из фазовых изображений исследуемых объектов.

В качестве эталонных зеркал могут использоваться супергладкие зеркала из карбида кремния, например, такие зеркала входят в состав некоторых интерферометров «белого света» фирмы Zygo.

В качестве эталонных зеркал также используются жидкие зеркала [2, 3]. Жидким зеркалом называют поверхность вязкой жидкости, которая под действием гравитации принимает форму идеальной плоскости.

Основным источником погрешности при работе с жидкими зеркалами является вибрация, которую можно компенсировать при обработке интерферометрических данных, используя специальные алгоритмы.

В настоящей работе рассматривается опыт применения жидкого зеркала в качестве эталонной плоской поверхности для абсолютной калибровки интерференционного микроскопа, построенного по схеме Линника. Малое поле зрения микроскопов при значительно больших размерах лотка, в котором эта жидкость находится, позволяет уменьшить влияние кривизны жидкого зеркала из-за мениска на краях лотка. Проведено сравнение результатов измерений высоты рельефа эталонной пластины на интерференционном микроскопе, откалиброванном по жидкому и стеклянному зеркалам. Полученные данные показывают, что использование жидкого зеркала в качестве базовой поверхности позволяет получить более точные результаты по сравнению со стеклянным зеркалом или измерениями без базовой поверхности.

#### *Список источников*

1. Вишняков Г.Н., Левин Г.Г., Минаев В.Л., Цельмина И.Ю. Интерференционная микроскопия субнанометрового разрешения по глубине. Экспериментальные исследования // Оптика и спектроскопия. 2014. Т. 116. № 1. С. 170-175.
2. Ketelsen D.A., Anderson D.S.. Optical testing with large liquid flats // Proc. SPIE. 1988. V. 966. P. 365-371.
3. Vannoni M., Molesini G. Validation of absolute planarity reference plates with liquid mirror // Metrologia. 2005. V. 42. P. 389-393.

В.А. СМОЛЬЯНИНОВ, О.Ф. ПРОСОВСКИЙ, А.Н. ИСАМОВ,  
Ю.О. ПРОСОВСКИЙ, Д.Н. ПЕТРАЧКОВ

*Обнинское научно-производственное предприятие «Технология» им. А.Г. Ромашина*

## **ПОЛУЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ С ЗАДАННЫМ ГРАДИЕНТОМ ТОЛЩИНЫ НА ИЗДЕЛИЯ АВИАЦИОННОГО ОСТЕКЛЕНИЯ**

В работе представлено получение токопроводящих оптических покрытий с заданным профилем толщины путём применения алгоритма плавной регулировки частоты вращения шагового двигателя.

V.A. SMOL'YANINOV, O.F. PROSOVSKIY, A.N. ISAMOV,  
Yu.O. PROSOVSKIY, D.N. PETRACHKOV

*Obninsk Research and Production Enterprise Technologiya, Kaluga Region*

## **OPTICAL COATINGS WITH A SPECIFIED THICKNESS GRADIENT PRODUCTION FOR AVIATION GLAZING PRODUCTS**

In this paper obtaining conductive optical coatings with a specified thickness profile by applying a smooth stepper motor speed control algorithm is discussed.

С развитием технологий в авиационной промышленности возникает необходимость в более точных и эффективных методах обработки стеклянных изделий. Одной из основных задач является обеспечение однородного градиента толщины оптического покрытия на изделиях авиационного остекления (рис. 1). Для достижения этой цели важную роль играет применение шагового двигателя. Оптимизация его работы через внедрение алгоритма управления, включающего плавную регулировку частоты вращения, позволило значительно улучшить не только качество производимых изделий, но и достичь необходимых резистивных и оптических параметров при нанесении (методом магнетронного распыления мишени) функциональных плёнок оксида сплава индия-олова (ИТО) [1] на подложку из силикатного стекла сложной формы, применяемого в производстве электрообогревного лобового остекления авиации гражданского назначения.

Апробация оптимизированного алгоритма управления шаговым двигателем проводилась на магнетронной установке для нанесения

электрообогревных покрытий на изделия авиационного остекления, оснащённой шаговым двигателем и специально разработанной системой управления [2].

Разработанный алгоритм управления вращением шагового двигателя позволил нанести оптическое покрытие, имеющее стабильный коэффициент пропускания во всех зонах измерения, а также равномерное удельное поверхностное сопротивление, что существенным образом повысило качество выпускаемой продукции (рис. 1).

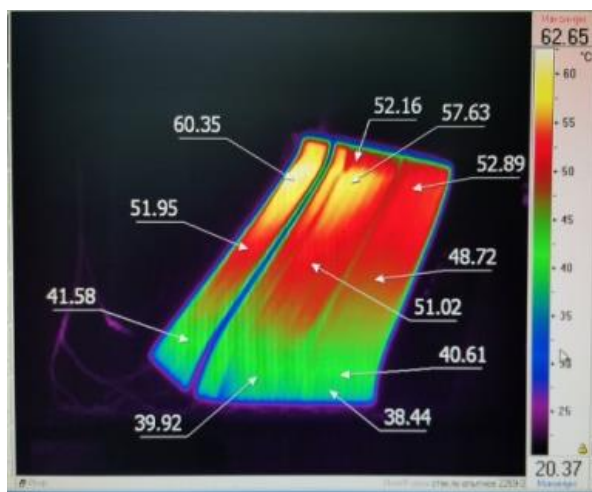


Рис. 1. Термограмма электрообогревного изделия с неоднородностью толщины функционального покрытия

#### Список литературы

1. Смольянинов В.А., Просовский Ю.О., Просовский О.Ф. и др. Исследование адгезии лакового покрытия к тонким плёнкам оксидов металлов // Вакуумная техника и технологии: Труды XXXI всероссийской научно-технической конференции с международным участием, СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2024. С. 346-348.
2. Буднев А.Ю., Просовский О.Ф., Исамов А.Н. и др. Особенности методов корректирования сопротивления токопроводящих оптических покрытий на основе ИТО при помощи источника ионов с замкнутым дрейфом электронов // Вакуумная техника и технологии: Труды XXXI всероссийской научно-технической конференции с международным участием, СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2024. С. 226-230.



В.В. ТЕРЕХИН<sup>1,2</sup>, О.В. ГРИГОРЬЕВ<sup>2</sup>, К.М. ОГУРЦОВА<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

<sup>2</sup>ООО «ИПК «Электрон-Маш», Зеленоград

<sup>3</sup>ООО «СВЧ КИТ», Москва

## **ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ «СВЧ КИТ» В РАДИОФОТОНИКЕ**

Обсуждаются перспективы расширения модульной платформы «СВЧ КИТ» на область радиофотоники и возможности реализации гибридных оптоэлектронных схем, включая оптоэлектронный автогенератор, на основе унифицированных СВЧ-модулей и специализированных фотонных компонентов.

V.V. TEREKHIN<sup>1,2</sup>, O.V. GRIGORIEV<sup>2</sup>, K.M. OGURTSOVA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

<sup>2</sup>LLC «IPK «Electron-Mash», Zelenograd

<sup>3</sup>LLC «MW KIT», Moscow

## **PROMISING DIRECTIONS FOR THE DEVELOPMENT OF «SVCH KIT» SYSTEMS IN RADIOPHOTONICS**

The prospects for extending the modular microwave prototyping platform (MW KIT) to the field of radio-photonics are discussed, as well as the potential for implementing hybrid opto-electronic circuits, including an optoelectronic oscillator, based on standardized microwave modules and dedicated photonic components.

Система быстрого прототипирования СВЧ-трактов «СВЧ КИТ» (рис. 1) представляет собой модульную платформу, включающую унифицированные усилители, фильтры, смесители, детекторы и другие элементы СВЧ-электроники [1]. Платформа обеспечивает возможность быстрого макетирования и исследования микроволновых трактов без разработки отдельных печатных плат и активно используется в учебных и исследовательских задачах.

«СВЧ КИТ» ориентирован на СВЧ-устройства, но модульная архитектура платформы обладает значительным потенциалом для интеграции элементов радиофотоники. Унифицированные электрические интерфейсы, стандартизованная механика и возможность расширения набора модулей позволяют рассматривать «СВЧ КИТ» как основу для создания гибридных оптоэлектронных трактов.

В работе обсуждаются направления развития платформы в область радиофотоники, включая возможность создания модулей фотодиодов, электрооптических модуляторов, лазерных источников и переходов к оптическому волокну. Для иллюстрации перспектив применения рассматривается концептуальная схема оптоэлектронного генератора (ОЭГ) (рис. 2), в которой электронная часть может быть реализована на базе существующих модулей «СВЧ КИТ», а оптическая – дополнена специализированными фотонными компонентами. Такой подход позволит сформировать гибридный прототип ОЭГ и исследовать режимы генерации, спектральные характеристики и структуру обратной связи.



Рис. 1. Внешний вид платформы быстрого прототипирования «СВЧ КИТ»

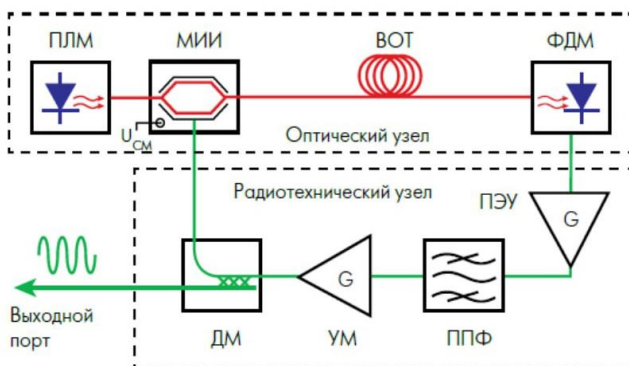


Рис. 2. Принципиальная схема оптоэлектронных генераторов

#### Список литературы

1. Гаранович Д., Григорьев О. Быстрое прототипирование СВЧ-трактов на отечественной ЭКБ с помощью системы «СВЧ КИТ» // СВЧ-электроника. 2025. № 4. С. 52-54.

Н.С. ЛАСКАВЫЙ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Пермская научно-производственная приборостроительная компания*

<sup>2</sup>*Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

## **ФОТОННАЯ РАДИОЧАСТОТНАЯ ПАМЯТЬ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕЦИРКУЛЯЦИОННОЙ ЛИНИИ ЗАДЕРЖКИ**

В работе кратко описываются актуальность реализации систем моделирования радиолокационных целей для задач разработки радаров с использованием фотонной радиочастотной памяти. Приведены схема разработанного устройства и результаты исследования его параметров. В выводах представлены направления дальнейшего развития устройства.

N.S. LASKAVIY<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company*

<sup>2</sup>*Perm National Research Polytechnic University*

## **PHOTONIC RADIO FREQUENCY MEMORY USING A RECIRCULATING DELAY LINE**

This paper briefly describes the relevance of implementing radar target modeling systems for radar development using photonic radiofrequency memory. We present a schematic of the developed device and the results of a parameter study. In the conclusions, we outline directions for further development of the device.

В процессе разработки радаров необходимо проводить испытания. Они могут быть как полевые, с использованием реальных целей, так и с использованием моделей сценариев работы. В отличие от натурных, моделирование позволяет значительно сократить стоимость и трудоёмкость испытаний при этом значительно повышая их эффективность. Для моделирования дальности до цели необходимо вносить временную задержку в зондирующий сигнал, это соответствует времени пролета зондирующего импульса до цели и его возвращения до приёмной системы радара.

На данный момент эту задачу решают с помощью цифровой радиочастотной памяти (ЦРЧП). Типовая система ЦРЧП включает в себя каскады понижающего и повышающего преобразования частоты, аналого-цифровой (АЦП) и цифро-аналоговый (ЦАП) преобразователи, блок памяти с контроллером и гетеродин. Однако процессы аналого-цифрового

преобразования и двойного преобразования частоты создают фундаментальные ограничения, препятствующие одновременному достижению высокой точности сохранения сигнала и высокого быстродействия системы.

Эффективным решением вышеуказанных проблем является радиوفотонный подход. В радиوفотонных системах входной радиочастотный сигнал преобразуется в модулированный оптический сигнал и впоследствии задерживается в оптических волноводах, данный тип приборов по аналогии с ЦРЧП можно назвать фотонной радиочастотной памятью (ФРЧП). Исключение АЦП и понижающего/повышающего преобразования позволяет преодолеть присущие радиоэлектронике проблемы. С помощью ФРЧП возможно достичь широкого частотного диапазона и высокой скорости отклика.

Чтобы реализовать модель одиночной цели на экране радаров необходима ФРЧП, которая состоит из источника излучения, модулятора оптического излучения радиочастотным сигналом, волоконного контура заданной длины и фотоприёмного модуля.

Для того чтобы на экране радаров отобразилась не одна, а множество целей со строго заданным расстоянием между друг другом можно использовать ФРЧП с рециркуляционной линией задержки. В данном устройстве излучение после прохождения волоконного контура поступает на делитель оптического излучения, часть которого возвращается в контур, тем самым создавая резонатор, а часть поступает на фотоприёмный модуль и преобразовывается в радиочастотный сигнал.

Фотонная радиочастотная память с использованием рециркуляционной линии задержки и шагом между копия входного сигнала 500 нс, была реализована в ПАО «ПНППК». Испытания показали, что количество различных повторений достигает нескольких сотен, что может характеризовать устройство как пригодное для задач моделирования множества целей применительно к разработке радарных систем.

#### *Список литературы*

1. Егоров Н., Кочемасов В. Технология цифровой радиочастотной памяти и ее применение в системах РЭБ // Электроника: наука, технология, бизнес. 2016. №10. С. 62-71.
2. Ding Z., Yang F., Cai H., Weng Y., Wang M., Wang D. Photonic radio frequency memory with controlled doppler frequency shift // 2019 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP). 2019. P. 1-3.
3. Zhang J. An optical RF memory with an ultra-long storage time of 13 ms // Optica Open. 2025.

М.И. КАЗЬМИН, В.А. НЕБАВСКИЙ, Р.С. СТАРИКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ В СТАНДАРТНЫХ МОДУЛЯТОРАХ МАХА–ЦЕНДЕРА**

Представлены результаты экспериментов, направленных на исследование формирования оптического спектра в стандартных модуляторах Маха–Цендера при условии балансирующей подачи напряжения в каждое из плеч. Приведены результаты численного моделирования процессов, связанных с созданием фазовой модуляции в каждом из плеч модулятора, а также особенности интерференционной картины, возникающей при одночастотной модуляции.

M.I. KAZMIN, V.A. NEBAVSKIY, R.S. STARIKOV

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

## **FORMATION OF OPTICAL SPECTRA IN STANDARD MACH–ZEHNDER MODULATORS**

The results of experiments aimed at studying the formation of the optical spectrum in standard Mach–Zehnder modulators are presented under the condition of balanced voltage supply to each of the arms. The results of numerical modeling of the processes associated with the creation of phase modulation in each of the arms of the modulator, as well as the features of the interference pattern that occurs with single-frequency modulation, are also presented.

Модулятор Маха–Цендера (ММЦ) — одно из наиболее распространённых средств внешней модуляции в волоконно-оптических линиях [1]. Большинство принципов работы основных схем реализаций ММЦ широко известны [2, 3], однако некоторые вопросы о формировании оптического спектра остаются без внимания в пользу исследования сигнала фотодетектора. При этом изучение особенностей оптического спектра помогает оценить неточности при изготовлении устройств.

Целью работы является изучение поведения оптического и электрического спектров в различных состояниях рабочей точки ММЦ для изучения возможности измерения отклонений от идеального рабочего состояния. Для этого были проведены численное моделирование, а также эксперименты по однотоновой модуляции ММЦ (рис. 1). По форме изменений спектра в экспериментах можно оценить качество

функционирования ММЦ, а следовательно, оценить влияние неточности работы контроллера рабочей точки и конструктивных особенностей.

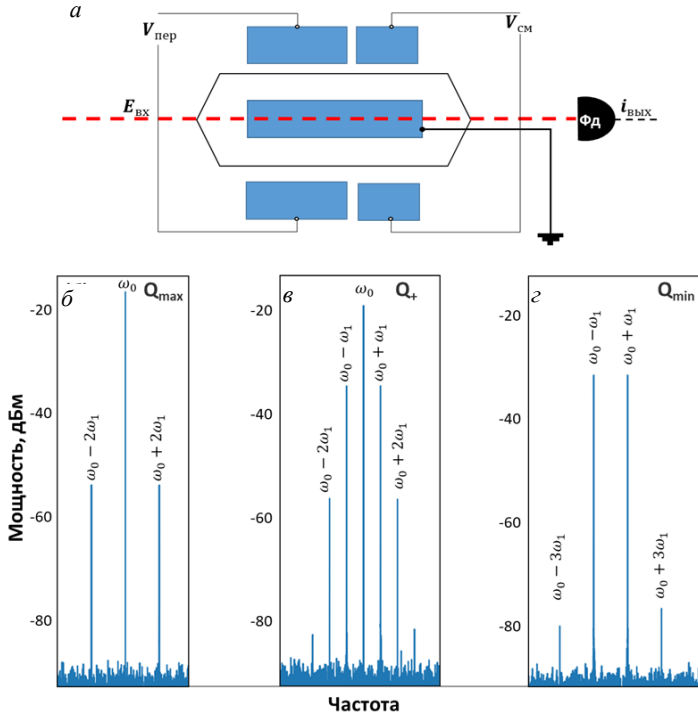


Рис. 1. Оптические спектры модулированного излучения стандартного ММЦ (а) работающего в разных режимах: максимум (б), квадратура (в), минимум (г)

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 24-19-00898.

#### Список литературы

1. Afanas'ev V.A., Ponomarev R.S. // Applied Photonics. 2018. V. 3 (4). P. 341.
2. Zadernovskii A.A., Shcherbakov V.V., Solodkov A.F. // Journal of Communications Technology and Electronics. 2021. V. 66 (9). P. 1053-1057.
3. Min X. // Journal of Lightwave Technology. 2014. V. 32 (19). P. 3317-3323.

Е.В. КАБАК<sup>1,2</sup>, Г.А. КОЛОСОВ<sup>1</sup>, А.С. ШОРОХОВ<sup>1</sup>,  
А.А. ФЕДЯНИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (филиал),  
Саров, Нижегородская обл.

## **ОПТИЧЕСКИЕ МОДОВЫЕ ДЕЛИТЕЛИ НА НИТРИДНО-КРЕМНИЕВОЙ ПЛАТФОРМЕ**

В рамках данного исследования проводилась разработка оптических модовых делителей, базирующихся на нитридно-кремниевой платформе, для использования в системах оптических вычислений. Оптимизация устройств, выполненных в виде пиксельных структур, осуществлялась посредством численного моделирования с применением генетического и градиентного алгоритмов. Достигнутая эффективность работы структур составила 60 %.

E.V. KABAK<sup>1,2</sup>, G.A. KOLOSOV<sup>1</sup>, A.S. SHOROKHOV<sup>1</sup>,  
A.A. FEDYANIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University

<sup>2</sup>Sarov branch of Lomonosov Moscow State University, Nizhny Novgorod region

## **OPTICAL MODE SPLITTERS BASED ON NITRIDE SILICON FOUNDATION**

This research focused on developing optical mode splitters on a silicon nitride platform for use in optical computing systems. Device optimization, implemented as pixelated structures, was performed using numerical simulations with genetic and gradient-based algorithms. The achieved operational efficiency of structures was 60 %.

Современные вычислительные системы, особенно в области искусственного интеллекта, обладают повышенными требованиями к скорости и энергоэффективности [1]. Векторно-матричное умножение – ключевая операция, и его ускорение, а также оптимизация энергопотребления – важные задачи. Оптические вычисления открывают перспективы для значительного увеличения скорости благодаря высокой скорости света и возможности параллельной обработки. Кроме того, оптические подходы могут снизить энергопотребление по сравнению с электронными аналогами, что критично для масштабируемых архитектур.

В данной работе исследуется подход деления волноводных мод с помощью пиксельного модового делителя на нитридно-кремниевой

платформе, который совместно с реконфигурируемой структурой, выполняющей модовое преобразование излучения [2, 3], позволяет получать числовые значения в оптической области. В отличие от крупных (до 30 мкм) асимметричных направленных ответвителей, используемых в [2], предлагаются модовые делители с меньшим форм-фактором (до 7 мкм), позволяющие создавать компактные устройства с высокой плотностью интеграции. Структуры были численно оптимизированы методами генетического и градиентного алгоритмов с использованием FDTD. Их эффективность работы составляет 60 %. Рис. 1 и 2 иллюстрируют процесс переключения мод  $TE_0$  и  $TE_1$  структурами, полученными с помощью градиентного и генетического алгоритмов соответственно.

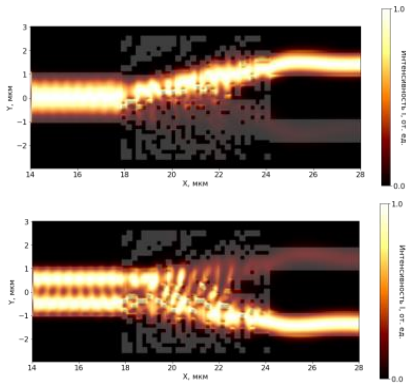


Рис. 1. Деление моды в выходные волноводы структурой, полученной с помощью градиентного алгоритма

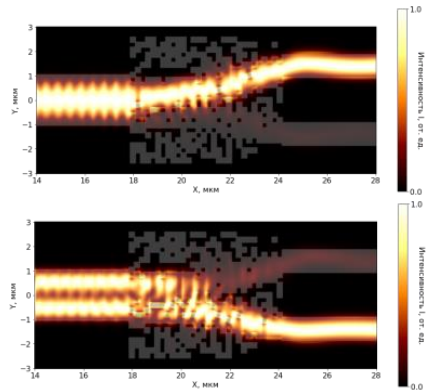


Рис. 2. Деление моды в выходные волноводы структурой, полученной с помощью генетического алгоритма

#### Список литературы

1. Мусорин А.И. и др. Подходы фотоники для реализации нейроморфных вычислений // Успехи физических наук. 2023. Т 193. С. 1284.
2. Wu C., et al. Programmable phase-change metasurfaces on waveguides for multimode photonic convolutional neural network // Nat. Commun. 2021. V 12. No. 1. P. 8.
3. Wei M., et al. Inverse design of compact nonvolatile reconfigurable silicon photonic devices with phase-change materials // Nanophotonics. 2024. V. 13. P. 2183-2192.



М.А. КУНЕЦ<sup>1,2</sup>, А.А. АШУРКОВА<sup>1,2</sup>, А.Е. ШИТИКОВ<sup>1</sup>,  
Д.А. ЧЕРМОШЕНЦЕВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Российский квантовый центр, Сколково

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

## ЭФФЕКТИВНОЕ КОДИРОВАНИЕ ПРОИЗВОЛЬНЫХ СПИНОВЫХ СИСТЕМ ИЗИНГА В ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФОТОННОЙ МАШИНЕ ИЗИНГА

Предложен метод кодирования конфигурации спиновой системы с матрицей плотности полного ранга с помощью фазовой маски модулятора, требующий минимальную площадь активных пикселей пространственного модулятора света (МС). На основе метода собран макет пространственной фотонной машины Изинга (ПФМИ) на котором решена задача поиска минимума энергии для спиновых систем с порядком взаимодействия 2 и 3 со случайно заданной разреженной матрицей Изинга полного ранга.

M.A. KUNETS<sup>1,2</sup>, A.A. ASHURKOVA<sup>1,2</sup>, A.E. SHITIKOV<sup>1</sup>,  
D.A. CHERMOSHENTSEV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Russian Quantum Centre, Skolkovo

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

## EFFICIENT ENCODING OF ARBITRARY SPIN ISING SYSTEMS ON SPATIAL PHOTONIC ISING MACHINE

A method for encoding the configuration of a spin system with a full-rank density matrix using a phase mask of a modulator is proposed, requiring a minimum area of active pixels of a spatial light modulator (SLM). Based on the method, a mock-up of an spatial photonic Ising machine (SPIM) has been assembled, which solves the problem of finding the minimum energy for spin systems with 2- and 3-local Hamiltonian for a randomly specified sparse full rank Ising matrix.

Перспективным способом для решения большого числа NP-сложных задач выступают пространственные фотонные машины Изинга (ПФМИ), способные повысить скорость вычисления и качество решений в сравнении с классическими вычислительными устройствами. Эти системы могут иметь различную архитектуру: от использования нескольких МС [1] до мультиплексирования по длине волны [2]. Целью нашей работы было создание ПФМИ с наиболее эффективным методом кодирования информации об оптимизационной задаче в фазовой маске

МС. Её удалось достичь с помощью объединения метода калибровочного преобразования спинов [3] и использования спинов-анцилл [4]. Это снимает ограничения на ранг матрицы без необходимости мультиплексирования и дает возможность использовать лишь один МС.

На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки. В качестве источника использовался Ti:Sa лазер (791 нм). Расчёт энергии проводился через фурье-преобразование линзой L3. На рис. 2 показан ряд результатов запуска алгоритма имитации отжига на установке для разного типа систем. Рис. 2а демонстрирует хорошее соответствие с моделированием статистики полученных решений 50 независимых запусков для системы 20 спинов с плотной бинарной матрицей. На рис. 2б приведена динамика энергии кубического гамильтониана разреженной системы 50 спинов в процессе отжига. Тем самым продемонстрирована способность установки к минимизации энергии кубических систем.

Работа выполнена при поддержке Госкорпорации «Росатом» в рамках выполнения Дорожной карты «Квантовые вычисления» (Договор № 868/1759-Д от 03.10.2025).

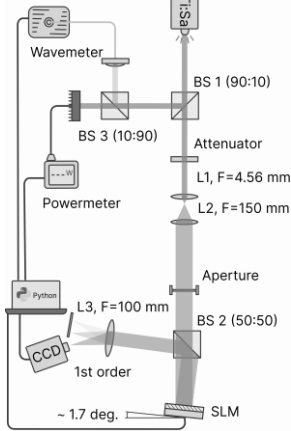


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

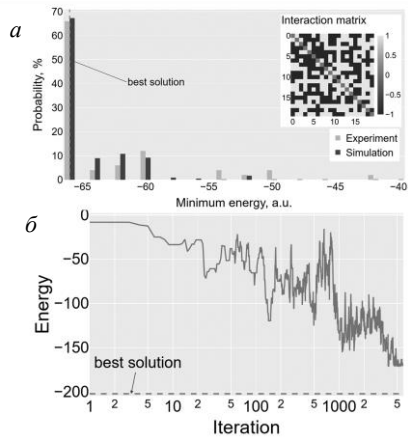


Рис. 2. Статистика решений системы из 20 спинов (а), динамика энергии функционала третьей степени (б)

#### Список литературы

1. Yamashita H. et al. // Physical Review Letters. 2023. V. 131. No. 6. P. 063801.
2. Luo L., et al. // Science Advances. 2023. V. 9. No. 48. P. 6238.
3. Fang Y., Huang J., Ruan Z. // Physical Review Letters. 2021. V. 127. No. 4. P. 043902.
4. Sakellariou J. et al. // Physical Review Letters. 2025. V. 134. No. 20. P. 2038.

Е.В. СОБОЛЕВА, С.С. РУДЫЙ, А.В. ИВАНОВ

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **ОПТОМЕХАНИЧЕСКАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ АНАЛОГОВОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ УПРАВЛЯЕМОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ БИФУРКАЦИИ**

Предложена платформа, состоящая из оптомеханической системы с оптическим управлением динамики заряженной микрочастицы в поверхностной ловушке и электронного блока, вычисляющего управляющий сигнал обратной связи. Оптомеханическая система демонстрирует управляемую пространственную бифуркацию типа «вилка», позволяющую реализовать бистабильную динамику заряженной частицы, необходимую для кодирования бинарных спинов. Показано, что параметр бифуркации напрямую связан с мощностью оптического излучения, что обеспечивает точный оптический контроль над состоянием динамической системы. Показано, что предложенная платформа в режиме временного мультиплексирования может использоваться в качестве аналогового вычислителя для решения задач комбинаторной оптимизации.

E.V. SOBOLEVA, S.S. RUDYI, A.V. IVANOV

*ITMO University, Saint Petersburg*

## **OPTOMECHANICAL PLATFORM FOR ANALOG INFORMATION PROCESSING BASED ON CONTROLLABLE SPATIAL BIFURCATION**

We propose a platform comprising an optomechanical system with optical control of a charged microparticle's dynamics in a surface trap, combined with an electronic unit that computes the feedback control signal. The optomechanical system exhibits a controllable pitchfork-type spatial bifurcation, enabling bistable dynamics of the charged particle essential for encoding binary spins. We demonstrate that the bifurcation parameter is directly linked to the optical power, providing precise optical control over the state of the dynamical system. Furthermore, we show that the proposed platform, operating in a time-multiplexing regime, can be employed as an analog processor for solving combinatorial optimization problems.

Одной из актуальных задач современности является разработка альтернативных вычислительных платформ для решения NP-трудных задач комбинаторной оптимизации, возникающих в логистике, биоинформатике, финансах и других областях [1]. Перспективным подходом является разработка аналоговых устройств – машин Изинга,

моделирующих поведение спиновой системы и ищущих минимум гамильтониана Изинга, эквивалентный оптимуму целевой функции. В отличие от цифровых решателей, такие системы эволюционируют к глобальному минимуму энергии, как реальные физические системы, обеспечивая потенциальное ускорение вычислений.

Предлагаемая оптомеханическая платформа основана на гибридной радиочастотной ловушке, состоящей из пяти прозрачных электродов из оксида индия-олова (ИТО) и лазерного пучка, направленного перпендикулярно поверхности электродов. Заряженная диэлектрическая микрочастица удерживается в ловушке за счёт суперпозиции оптического и электрического потенциалов. Динамика частицы описывается усреднённым эффективным потенциалом, аналитически приведённым к виду потенциала Дюффинга. Ключевым условием реализации машины Изинга является управляемая бифуркация, позволяющая кодировать двоичные состояния спинов через устойчивые положения равновесия микрочастицы (рис. 1). Бифуркационная диаграмма  $Y_0(\alpha)$  имеет классический вид «вилки», что подтверждает возможность кодирования спинов  $\sigma = \text{sign}(Y)$ .

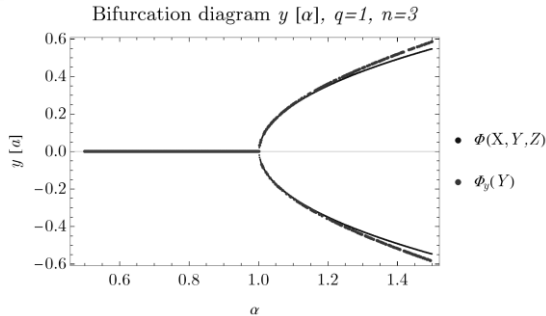


Рис. 1. Бифуркационная диаграмма  $Y_0(\alpha)$

Управление мощностью лазерного излучения позволяет реализовать обратную связь, аналогичную оптоэлектронным машинам [2]. В отличие от когерентных машин Изинга, чувствительных к фазовым флуктуациям, предложенная платформа является упрощённой и более устойчивой реализацией аналогового вычислителя нового типа.

#### Список литературы

1. Lucas A. Ising formulations of many NP problems // Front. Phys. 2014. V. 2. P. 5.
2. Böhm F., et al. A poor man's coherent Ising machine based on opto-electronic feedback systems // Nat. Commun. 2019. V. 10. P. 3538.

Д.А. САМОДЕЛКИН<sup>1,2</sup>, М.А. КУНЕЦ<sup>1,2</sup>, А.Е. ШИТИКОВ<sup>1</sup>,  
Д.А. ЧЕРМОШЕНЦЕВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Российский квантовый центр, Сколково

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

## **АНАЛИЗ СЛУЧАЙНОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ СОСТОЯНИЙ В НЕЛИНЕЙНОМ КОЛЬЦЕВОМ РЕЗОНАТОРЕ С РУБИДИЕВОЙ ГАЗОВОЙ ЯЧЕЙКОЙ**

Нами изучалось явление поляризационной бистабильности в системе с кольцевым резонатором и нелинейным элементом – газовой ячейкой с парами рубидия. В ходе работы нами было показано, что статистические свойства оптических состояний при спонтанном нарушении поляризационной симметрии соответствуют биномиальному распределению с контролируемым средним, управляющимся поворотом полуволновой пластины.

D.A. SAMODELKIN<sup>1,2</sup>, M.A. KUNETS<sup>1,2</sup>, A.E. SHITIKOV<sup>1</sup>,  
D.A. CHERMOSHENTSEV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Russian Quantum Centre, Skolkovo

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

## **STATISTICAL ANALYSIS OF STATES IN POLARIZATION SELECTIVE NONLINEAR RING RESONATOR**

We studied the phenomenon of polarization bistability in polarization selective nonlinear ring resonator with a rubidium vapor cell. Our work demonstrated that the statistical properties of optical states under spontaneous polarization symmetry breaking follow a binomial distribution with a controllable mean via rotating a half-wave plate.

В настоящее время развитие новых аналоговых вычислительных машин, способных решать сложные комбинаторные задачи гораздо быстрее классических цифровых компьютеров вызывает большой интерес. Одной из таких вычислительных машин является когерентная машина Изинга, использующая оптические состояния для кодировки ассоциированных спиновых состояний в гамильтониане Изинга [1, 2]. В данной работе нами изучалась одна из возможных платформ, предложенная в статье [3].

Целью нашей работы было изучение статистических свойств оптических состояний в условиях спонтанного нарушения симметрии при

управлении параметрами поляризации в кольцевом резонаторе. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Нами использовалось явление самовращения эллипса поляризации в ячейке с парами рубидия ( $^{85}\text{Rb}$ ). Для выполнения фазовых условий в резонаторе измерения производились при сканировании его длины с помощью пьезозеркала (PM). Детектирование итоговой поляризации производилось фотодетекторами (PD1 и PD2), интенсивности на которых соответствовали интенсивностям левой и правой круговых поляризаций.

Рис. 2а демонстрирует способ формирования исследуемой последовательности из +1 и -1, исходя из преобладающей поляризации. Нами учитывались пики только при прямом сканировании напряжения на пьезозеркале (пунктирная линия). Сравнение функции распределения корреляторов полученной последовательности с теоретической для независимого выбора конечных состояний приведено на рис. 2б. Распределения совпадают с точностью 60 % (по критерию Хи-квадрат).

Наше исследование демонстрирует соответствие статистик получаемой случайной последовательности состояний с теорией, что свидетельствует об отсутствии корреляций наблюдаемых состояний.

Работа выполнена при поддержке Госкорпорации «Росатом» в рамках выполнения Дорожной карты «Квантовые вычисления» (Договор № 868/1759-Д от 03.10.2025).

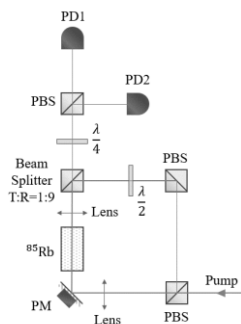


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. PM – пьезозеркало, PD1,

PD2 – фотодетекторы, PBS – поляризационные светоделители

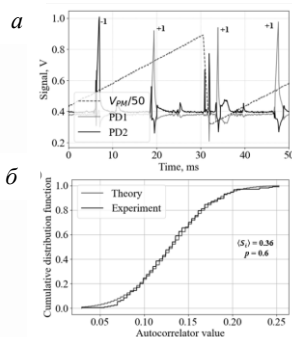


Рис. 2. Способ задания последовательности из +1 и -1 (а), сравнение функции распределения корреляторов с теоретической (б)

#### Список литературы

1. Calvanese Strinati M., Pierangeli D., Conti C. // Phys. Rev. Applied. 2021. V. 16. P. 054022.
2. Mohseni N., McMahon P.L., Byrnes T. // Nature Reviews Physics. 2022. V. 4. P. 363-379.
3. Manannikov K.S., et al. // Optics Letters. 2025. V. 50. P. 792-795.

В.В. АВДЕЕВ, О.А. ИРШКО, А.П. ПЛЁНКИН

*Южный федеральный университет, Таганрог*

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТЕРЬ В АТМОСФЕРНОМ ОПТИЧЕСКОМ КАНАЛЕ СВЯЗИ**

В работе приведены результаты экспериментальных исследований эффективности юстировки оборудования для снижения потерь в атмосферном канале квантовой связи. Описана телекоммуникационная система, в основе которой применяется волоконно-оптический и атмосферный каналы связи, а защищённость передаваемых данных основана на принципах квантовой криптографии. На лабораторной установке показано, что ручная юстировка позволяет добиться стабильной передачи сигнала. Исследовано влияние внешних дестабилизирующих факторов на атмосферный канал связи в лабораторных условиях. Продемонстрирована возможность сборки атмосферного канала связи из недорогостоящих материалов и без специализированного оборудования и его интеграция в оптический канал связи системы квантового распределения ключей.

V.V. AVDEEV, O.A. IRSHKO, A.P. PLJONKIN

*Southern Federal University, Taganrog*

## **EXPERIMENTAL STUDIES OF LOSSES IN AN ATMOSPHERIC OPTICAL COMMUNICATION CHANNEL**

This paper presents the results of experimental studies on the effectiveness of equipment alignment for reducing losses in an atmospheric quantum communication channel. A telecommunications system is described that utilizes fiber-optic and atmospheric communication channels, with the security of transmitted data based on the principles of quantum cryptography. Using a laboratory setup, it is demonstrated that manual alignment enables stable signal transmission. The influence of external destabilizing factors on the atmospheric communication channel is studied under laboratory conditions. The feasibility of assembling an atmospheric communication channel from inexpensive materials and without specialized equipment and integrating it into the optical communication channel of a quantum key distribution system is demonstrated.

Квантовые коммуникации сегодня, по сути, имплементируются в технологии квантового распределения ключей [1]. Существуют решения как для волоконно-оптических линий связи [2], так и для атмосферных. Атмосферные каналы квантовой связи рассматриваются как перспективный элемент для создания масштабируемых квантовых сетей,

позволяющих осуществлять распределение ключа между наземными объектами и спутниками. Однако практическая реализация таких каналов сталкивается с фундаментальным ограничением – значительными, непредсказуемыми потерями сигнала, вызванными атмосферной турбулентностью, поглощением и, что критически важно, ошибками юстировки приёмопередающей аппаратуры. Несмотря на активное изучение атмосферных эффектов, количественный вклад потерь, связанных исключительно с неточностью согласования оптических осей в гибридных линиях связи, остаётся недостаточно исследованным. В данной работе представлены результаты экспериментального исследования, направленного на измерение и минимизацию потерь юстировки в канале, состоящем из волоконно-оптического сегмента длиной 24 км и свободного пространственного тракта 1 м. Была собрана схема эксперимента, которая состоит из двух действующих систем квантового распределения ключей, соединённых оптическим волокном. На первом этапе эксперимента в разрыв квантового канала интегрированы два ответвителя мощности. Такая модификация не нарушает работу системы и позволяет провести ряд измерений в побочном тракте. На втором этапе к выходам ответвителей были подсоединены смонтированные на монтажном столе два коллиматора, (рис. 1), в качестве которых использовались обычные линзы с коннектором FC, доступные в свободной продаже. В ходе эксперимента проводилась юстировка пары коллиматоров с одновременной регистрацией уровня оптической мощности на измерителе Keysight N7744A. Ручная юстировка позволила достичь оптимального значения мощности в -21 дБм.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 25-29-00007.

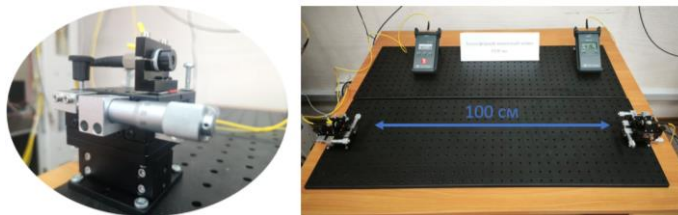


Рис. 1. Экспериментальный стенд АОЛС

#### *Список литературы*

1. Gisin N., Ribordy G., Tittel W., Zbinden H. Quantum cryptography // *Reviews of Modern Physics*. 2002. V. 74. No. 1. P. 145-195.
2. Pljonkin A., Petrov D., Sabantina L., Dakhkilgova K. Nonclassical Attack on a Quantum Key Distribution System // *Entropy*. 2021, V. 23. P. 509.



С.М. ПОПОВ, А.А. РЫБАЛТОВСКИЙ<sup>1</sup>, Д.В. РЯХОВСКИЙ,  
А.С. ШИКИН<sup>2</sup>, Д.С. ЛИПАТОВ<sup>3</sup>, Ю.К. ЧАМОРОВСКИЙ<sup>1</sup>

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

<sup>1</sup>*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

<sup>2</sup>*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва*

<sup>3</sup>*Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Десятых РАН, Нижний Новгород*

## **ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ИТТЕРБИЕВЫЙ СЛУЧАЙНЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР, РАБОТАЮЩИЙ В ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН 1070 нм**

Описывается перестраиваемый «случайный» волоконный лазер с резонатором на основе иттербиевого оптического волокна (ОВ) с массивом волоконных брэгговских решёток (ВБР) записанных в процессе вытяжки ОВ с использованием chirpированной фазовой маски. Полученная перестраиваемая лазерная генерация в области длин волн в 1069,8 - 1071,2 нм при накачке на длине волны 976 нм с эффективностью около 10 %.

S.M. POPOV, A.A. RYBALTOVSKIY<sup>1</sup>, D.V. RYAKHOVSKIY,  
A.S. SHIKIN<sup>2</sup>, D.S. LIPATOV<sup>3</sup>, Yu.K. CHAMOROVSKIY

*Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS*

<sup>1</sup>*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*

<sup>2</sup>*Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS, Moscow*

<sup>3</sup>*Devyatikh Institute of Chemistry of High-Purity Substances of the RAS, Nizhny Novgorod*

## **TUNABLE ITTERBIUM FIBER RANDOM LASER OPERATING IN THE 1070 nm WAVELENGTH RANGE**

A tunable «random» fiber laser with a resonator based on an ytterbium-doped optical fiber (OF) with an array of fiber Bragg gratings (FBGs) inscribed during the OF drawing process using a chirped phase mask is described. The resulting tunable laser generation in the wavelength range of 1069.8 - 1071.2 nm under pumping at a wavelength of 976 nm with slope efficiency about of 10 %.

Новым направлением исследований в области фотоники являются, так называемые, «случайные» волоконные лазеры, где обратная связь достигается за счёт рассеяния Рэлея, а усиление за счёт эффектов рассеяния Рамана [1] или ВРМБ [2]. Ранее нами была получена перестраиваемая одночастотная лазерная генерация на длине волны 1546.5 - 1547.5 нм в оптическом волокне (ОВ), легированном ионами

эрбия с резонатором из массива волоконных брэгговских решёток (ВБР), состоящего из 300 отражателей (общая длина резонатора 3 м) с эффективностью около 10 % и шириной линии около 470 Гц [3]. Запись массива ВБР происходит во время процесса вытяжки ОВ с помощью эксимерного УФ-лазера работающего на  $\lambda = 248$  нм. В данной работе перестраиваемая лазерная генерация в области длин волн 1069,8 - 1071,2 нм получена с использованием «полуоткрытой» конфигурации [4], состоящей из массива ВБР записанного в ОВ легированного иттербием и сильноотражающей ВБР (более 95 % на длине волны 1069,8 нм – фемтосекундная технология). Массив ВБР записан с использованием chirпированной фазовой маски (с переменным периодом) – 739.5...742.5 нм длиной 10 мм. Это даёт отражение в области длин волн 1070 - 1074 нм. Перестройка лазера в области длин волн 1069...1071 нм и более достигается с помощью растяжения сильноотражающей ВБР с помощью специального стрейчера (рис. 1). Дифференциальная эффективность лазерной генерации – около 10 % (рис. 2).

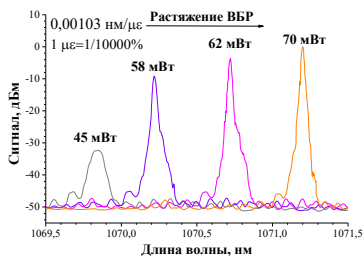


Рис. 1. Зависимость длины волны лазерной генерации от растяжения 95 % ВБР и мощности накачки на  $\lambda = 976$  нм

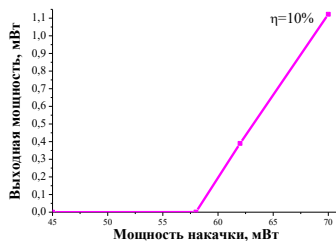


Рис. 2. Эффективность «случайной» лазерной генерации на  $\lambda = 1070$  нм

Диаметр сердцевины/оболочки ОВ – 7,25 / 125 мкм, длина волны отсечки 830 нм, длина резонатора 3 м (300 ВБР). Эффективность лазерной генерации при длине волны накачки 976 нм составляет величину 10 %. Максимальная выходная мощность в одночастотном режиме – 1,2 мВт.

Работа выполнена в рамках госзадания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Изготовление и характеристика преформ активных ОВ выполнены А.А. Рыбалтовским и Д.С. Липатовым по проекту РНФ № 24-19-00302.

#### Список литературы

1. Turitsyn S.K., Babin S.A., et al. // Nature Photonics. 2010. V. 9. P. 231.
2. Fotiadi A.A. // Nature Photonics. 2010. V. 4. P. 204.
3. Popov S.M., Rybaltovsky A.A., et al. // Optical Fiber Technology. 2025. V. 95. P. 104405.

С.А. ОСТРИКОВ, А.В. ХАРАХОРДИН, С.В. ФИРСТОВ  
*Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова ИОФ РАН, Москва*

## **ВИСМУТОВЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР, ИЗЛУЧАЮЩИЙ НА 1256 нм, С ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТЬЮ БОЛЕЕ 10 Вт**

Приведены результаты по разработке и исследованию характеристик семейства непрерывных висмутовых волоконных лазеров, излучающих в спектральном диапазоне 1180 - 1300 нм. Такие лазеры были созданы на основе нового типа активных волоконных световодов с легированной висмутом сердцевинной, содержащей структурные  $\text{AlPO}_4$  комплексы. Впервые был реализован висмутовый волоконный лазер, работающий на длине волны 1256 нм с выходной мощностью > 10 Вт и дифференциальной эффективностью до 30 %, используя 25 м отрезок активного световода.

S.A. OSTRIKOV, A.V. KHARAKHORDIN, S.V. FIRSTOV  
*Dianov Fiber Optics Research Center of Prokhorov General Physics Institute of the RAS,  
Moscow*

## **BISMUTH-DOPED FIBER LASER EMITTING AT 1256 nm WITH OUTPUT POWER OVER 10 W**

The results concerning the development of a series of continuous-wave Bi-doped fiber lasers emitting in the spectral range of 1180 - 1300 nm and the study of their performance characteristics are presented. These lasers are based on a new type of active fiber with a Bi-doped glass core containing  $\text{AlPO}_4$  structural units. For the first time, a bismuth-doped fiber laser operating at a wavelength of 1256 nm with an output power exceeding 10 W and a slope efficiency of up to 30 % was achieved using a 25-m-long active fiber.

В эпоху развития и активного внедрения лазерных технологий особое значение имеют поисковые исследования по разработке новых типов активных сред с улучшенными спектральными, энергетическими, временными характеристиками. Световоды, легированные Bi, позволяют генерировать и усиливать ИК-излучение в спектральных областях, недоступных для устройств на основе волокон с редкоземельными ионами, которые широко применяются в различных областях науки и техники. Уникальные характеристики световодов, легированных Bi, обусловлены свойствами висмутовых активных центров (ВАЦ), которые зависят от структуры и химического состава стеклянной матрицы. Существуют четыре типа ВАЦ, которые имеют оптические переходы в

областях длин волн 1.1 мкм (ВАЦ-Al), 1.33 мкм (ВАЦ-P), 1.43 мкм (ВАЦ-Si), 1.73 мкм (ВАЦ-Ge) [1, 2]. Поиск новых разновидностей ВАЦ и подходов к их формированию является одной из актуальных задач в данном направлении, что, с одной стороны, позволит создать новые оптические устройства, а, с другой, расширить объём имеющихся данных о специфике формирования ВАЦ в стеклообразных материалах.

Целью работы является исследование оптических свойств легированного  $\text{Bi}$  световода с  $\text{AlPO}_4$  комплексами, а также изучение возможности создания на их основе мощных волоконных лазеров. По результатам исследования было установлено в таких световодах происходит формирование ранее неизвестных типов ВАЦ с полосой усиления в новой спектральной области. На основе полученных световодов было создано семейство лазеров, работающих в диапазоне длин волн 1180 - 1270 нм, при одномодовой накачке на 1137 нм (рис. 1а). Лазерные эксперименты были выполнены с использованием резонатора Фабри–Перо, где обратная связь обеспечивалась волоконной брэгговской решёткой с коэффициентом отражения  $\sim 100\%$  и торцом активного световода (френелевское отражение). Наилучшие лазерные характеристики (мощность  $> 10$  Вт; дифференциальная эффективность  $\approx 24 - 30\%$ ) были достигнуты на  $\lambda = 1256$  нм при использовании активного волокна  $L = 25$  м (рис. 1б).

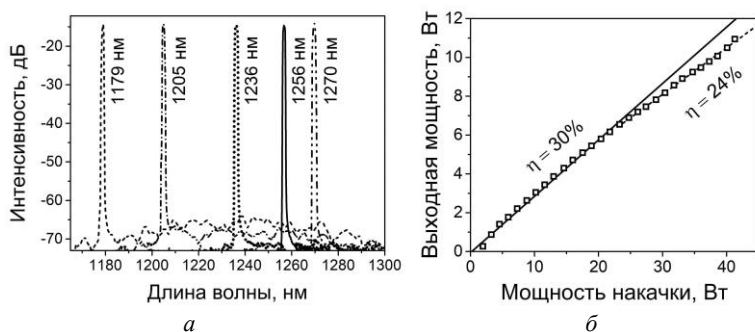


Рис. 1. Спектры генерации полученных лазеров (а), зависимость выходной мощности лазера на 1256 нм от мощности накачки (б)

Данная работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-19-00708-Р).

#### Список литературы

1. Firstov S.V., et al. // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2018. V. 24(5). P. 1-15.
2. Bufetov I.A., et al. // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2014. V. 20(5). P. 111-125.

А.В. СУДЬИН<sup>1</sup>, И.А. ВОЛКОВ<sup>1,2</sup>, С.Н. УШАКОВ<sup>1,3</sup>, К.Н. НИЩЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Мордовский государственный университет,  
Саранск

<sup>2</sup>Ульяновский государственный университет

<sup>3</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

## **ГЕНЕРАЦИЯ СИНХРОНИЗОВАННЫХ ДВУХВОЛНОВЫХ ШУМОПОДОБНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ВОЛОКОННОМ ЛАЗЕРЕ С ПАССИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД**

Представлена генерация двухволновых шумоподобных импульсов в эрбиевом волоконном лазере с длиной резонатора более 300 м. Импульсы с центральными длинами волн 1544 ( $\lambda_1$ ) и 1546 нм ( $\lambda_2$ ) синхронизированы друг с другом, что подтверждается модуляцией амплитуды на автокорреляции.

A.V. SUDIN<sup>1</sup>, I.A. VOLKOV<sup>1,2</sup>, S.N. USHAKOV<sup>1,3</sup>, K.N. NISHCHEV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk

<sup>2</sup>Ulyanovsk State University

<sup>3</sup>Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

## **GENERATION OF SYNCHRONIZED DUAL- WAVELENGTH NOISE-LIKE PULSES IN A PASSIVELY MODE-LOCKED FIBER LASER**

The generation of dual-wavelength noise-like pulses in a long-cavity Er/Yb-doped fiber laser is reported. Pulses with central wavelengths of 1544 ( $\lambda_1$ ) and 1546 nm ( $\lambda_2$ ) are shown to be synchronized, as evidenced by amplitude modulation observed in the autocorrelation trace.

Волоконные лазеры с пассивной синхронизацией мод способны генерировать шумоподобные импульсы, которые по своей природе имеют хаотическую внутреннюю структуру. При этом результаты исследований показали, что даже такие типы импульсов могут обладать пульсациями, переходить в гармоническую синхронизацию мод, а также образовывать связанные состояния [1 - 3]. Исходя из этого, дальнейшие исследования нелинейной динамики шумоподобных импульсов являются актуальными.

На рис. 1 представлена схема волоконного лазера для генерации синхронизованных двухволновых шумоподобных импульсов. Пассивная синхронизация мод основана на механизме нелинейной эволюции поляризации (НЭП). Генерации излучения на нескольких длинах волн

способствует внутриволновому фильтру, основанный на НЭП. Длина резонатора 321 м.

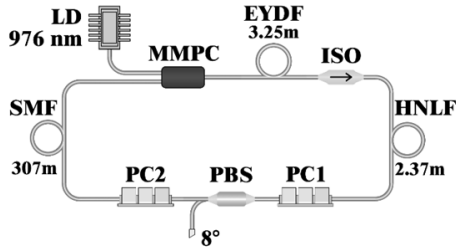


Рис. 1. Схема волоконного лазера

При мощности накачки 3 Вт была достигнута генерация двухволнового излучения (рис. 2). Шумоподобные импульсы трапецеидальную форму. Автокорреляция (АК) когерентного пика сопровождается модуляцией интенсивности с периодом 380 фс, который равен  $1/\Delta\nu$  ( $\Delta\nu$  - разность между максимумами оптического спектра в частотных единицах). Фильтруя выходное излучения с помощью фильтра Саньяка, интенсивность  $\lambda_2$  была подавлена, что привело к исчезновению модуляций интенсивности на АК когерентного пика. При этом, длительность когерентного пика оценивается в 1.2 пс. Эти результаты подтверждают, что длины волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  синхронизованы между собой.

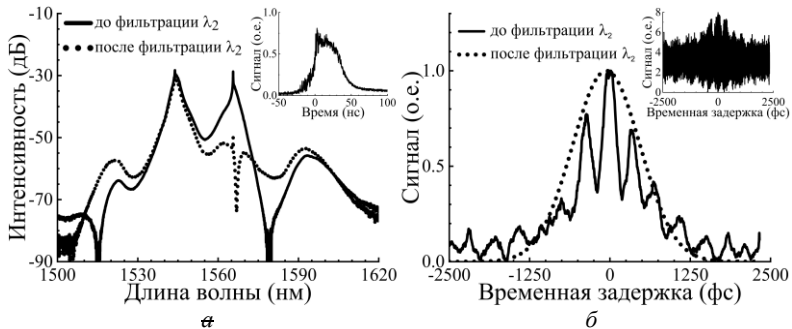


Рис. 2. Выходные характеристики двухволнового излучения до и после фильтрации  $\lambda_2$ : оптические спектры (а, вставка – осциллограмма шумоподобного импульса); АК интенсивности (б, вставка – интерферометрическая АК)

#### Список литературы

1. Sudin A.V., Volkov I.A., et al. // Phys. Wave Phen. 2025. V. 33. P. 283-290.
2. Pottiez O., Hernández-García J.C., et al. // Laser Phys. 2014. V. 24. P. 115103.
3. Wang M., Liu M., et al. // Chin. Opt. Lett. 2021. V. 19. P. 091402.

В.Н. ИВАНОВ<sup>1</sup>, Д.В. БУЛЫГА<sup>1</sup>, А.В. САНДУЛЕНКО<sup>1</sup>,  
К.Н. МАКАРОВ<sup>3</sup>, Г.С. ПОЛИЩУК<sup>1</sup>, К.В. ДУКЕЛЬСКИЙ<sup>1</sup>,  
С.К. ЕВСТРОПЬЕВ<sup>1,2</sup>, И.А. БУЛЫЧОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный технологический институт  
(технический университет)

<sup>3</sup>АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк

## **РАЗРАБОТКА КЛАДДИНГА ДЛЯ МОЩНЫХ ЛАЗЕРОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМОИТТРИЕВОГО ГРАНАТА**

Приведены результаты экспериментов по использованию монокристаллов YAG:V и композита Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-эпоксидная смола в качестве кладдинга для подавления усиленного спонтанного излучения в активном элементе YAG:Yb. Было экспериментально продемонстрировано увеличение интенсивности люминесценции за счёт подавления усиленного спонтанного излучения при использовании кладдинга. Наблюдаемое различие в интенсивности по сравнению с YAG:Yb без кладдинга составляет 11 - 13 %.

V.N. IVANOV<sup>1</sup>, D.V. BULYGA<sup>1</sup>, A.V. SANDULENKO<sup>1</sup>,  
K.N. MAKAROV<sup>3</sup>, G.S. POLISHCHUK<sup>1</sup>, K.V. DUKELSKII<sup>1</sup>,  
S.K. EVSTROPIEV<sup>1,2</sup>, I.A. BULYCHOV<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Vavilov State Optical Institute, Saint Petersburg

<sup>2</sup>Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)

<sup>3</sup>Troitsk Institute of Innovative and Thermonuclear Research

## **DEVELOPMENT OF CLADDING FOR POWERFUL SOLID-STATE LASER SYSTEM**

Presents the result of experiments using YAG:V single crystals and a Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-epoxy composite as a cladding to suppress amplified spontaneous emission in a YAG:Yb active element. An increase in luminescence intensity due to amplified spontaneous emission suppression using cladding was experimentally demonstrated. The observed difference in intensity compared to YAG:Yb without cladding was 11 - 13 %.

В мощных твердотельных лазерных системах [1] усилительные каскады, как правило, выполняются на базе дисковых активных элементов с достаточно большой апертурой, в пределах которой могут развиваться усиленное спонтанное излучение (ASE, amplified spontaneous emission), приводящее к потере энергии, запасённой в активных элементах. Для

подавления данных эффектов используется кладдинг – поглощающий материал, нанесённый на торцы активного элемента. Кладдинг поглощает излучение, препятствуя его переотражению и усилению при прохождении через активный элемент.

Цель работы – разработка и экспериментальное исследование кладдинга для лазерного кристалла YAG:Yb. В качестве поглощающих материалов были использованы YAG:V и композит на основе эпоксидной смолы и  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (смола ЭД-22, джеффамина D-230, трибутилфосфат, 10 масс. %  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Выращивание кристаллов осуществлялось методом ВНК в молибденовых тиглях в атмосфере Ag и  $\text{H}_2$ . С целью увеличения коэффициента поглощения в ближней ИК-области спектра кристалл YAG:V подвергался дополнительной термообработке при температуре 1600 °С в восстановительной атмосфере.

Результаты эксперимента представлены на рис. 1. Склеивание кладдинга и активного элемента осуществлялось при помощи клея, описанного в [2]. В качестве источника возбуждения использовалась ксеноновая лампа, в качестве приёмника – фотодиод ФД-24, подключённый к цифровому осциллографу. Значение интенсивности люминесценции ( $I_0$ ) определялось путём аппроксимации кривой затухания люминесценции экспоненциальной функцией ( $I = I_0 \exp(-t/\tau)$ ). Значения энергии возбуждения были значительно меньше порога лазерной генерации. В ходе эксперимента было показано, что при использовании кладдинга наблюдается существенное увеличение интенсивности люминесценции при высоких значениях энергии импульса накачки (до 13 % при  $E_{\text{имп}} = 55$  Дж).

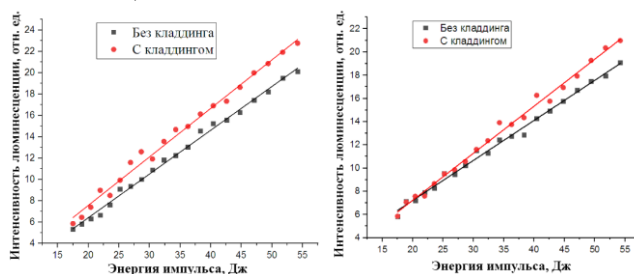


Рис. 1. Зависимость интенсивности люминесценции YAG:Yb от энергии импульса накачки при использовании кладдинга на основе  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (слева) и YAG:V (справа)

#### Список литературы

1. Swain J.E., et al. // J. of Applied Physics. 1969. V. 40. No. 10. P. 3973-3977.
2. Евстропьев С.К. и др. Оптический клей. Патент АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова», № 2833287. 22.04.2024.



М.В. РЕШЕТОВА<sup>1,2</sup>, А.А. ГАРМАТИНА<sup>1</sup>, Н.М.Р. КРИМАН<sup>3</sup>,  
А.А. КОНОВКО<sup>3</sup>, В.Е. АСАДЧИКОВ<sup>1</sup>, В.В. БЕРЕЗКИН<sup>1</sup>,  
Н.В. МИНАЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт фотонных технологий НИЦ «Курчатовский институт», Троицк*

<sup>2</sup>*Сколковский институт науки и технологий, Москва*

<sup>3</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КВАЗИСИНХРОННОЙ ГЕНЕРАЦИИ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ В ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ, ЗАПОЛНЕННЫХ ЙОДНОВОЙ КИСЛОТОЙ**

Приведены результаты экспериментов по облучению инфракрасным излучением фемтосекундного лазера с длиной волны 1032 нм структуры на основе стеклянных микроканалов, заполненных кристаллами йодноватой кислоты. В ходе экспериментов получен спектр второй гармоники (~ 516 нм). На микроструктурированном волокне наблюдалась дифракция, преломление и рассеяние излучения второй гармоники.

M.V. RESHETOVA<sup>1,2</sup>, A.A. GARMATINA<sup>1</sup>, N.M.R. KRIMAN<sup>3</sup>,  
A.A. KONOVKO<sup>3</sup>, V.E. ASADCHIKOV<sup>1</sup>, V.V. BEREZKIN<sup>1</sup>,  
N.V. MINAEV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute Photon Technologies of NRC «Kurchatov Institute», Troitsk*

<sup>2</sup>*Skolkovo Institute of Science and Technology*

<sup>3</sup>*Lomonosov Moscow State University*

## **QUASI-PHASE-MATCHED SECOND-HARMONIC GENERATION IN PHOTONIC CRYSTAL FIBERS FILLED WITH IODIC ACID**

The results of experiments irradiating a structure based on glass microchannels filled with iodic acid crystals with infrared radiation from a femtosecond laser with a wavelength of 1032 nm are presented. During the experiments, a second harmonic spectrum (~ 516 nm) was obtained. Diffraction, refraction, and scattering of the second harmonic were observed on the microstructured fiber.

На данный момент детектирование инфракрасного излучения с высоким разрешением по интенсивности затруднено необходимостью использования охлаждаемых фотодетекторов. Альтернативой охлаждаемым детекторам являются сенсоры, использующие нелинейное

преобразование излучения во вторую гармонику и дальнейшее детектирование в видимом диапазоне полупроводниковыми фотоприёмниками. Одним из вариантов преобразования инфракрасного излучения в видимое является квазисинхронная генерация второй гармоники в фотонно-кристаллических структурах [1, 2].

В представляемой работе исследуется фотонно-кристаллическая структура на основе йодноватой кислоты: полые волокна, сформированные термомеханическим методом, разработанным в ООО НПП «Наноструктурная технология стекла» (г. Саратов) [3], затем заполненные кристаллами йодноватой кислоты. Данная структура в сечении является двумерным фотонным кристаллом на основе материала с большим значением нелинейной поляризуемости – йодноватой кислотой. Образец представлял из себя цилиндр, длиной 2 см и диаметром 0.5 см. Структура волокон является иерархической с наименьшим диаметром канала 1 мкм.

Образец облучался сфокусированным излучением фемтосекундного лазера ТЕТА (Авеста, Россия):  $\lambda = 1032$  нм, длительность импульса  $t \sim 200$  фс, минимальная энергия в импульсе при которой наблюдался эффект составляла порядка 0,5 мкДж, диаметр пятна в перетяжке порядка 20 мкм, таким образом интенсивность на образце  $\sim 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>, частота повторения импульсов 10 кГц.

В ходе работы экспериментально зарегистрирована квазисинхронная генерация второй гармоники при облучении представленного образца фотонно-кристаллической структуры, на основе йодноватой кислоты. Излучение наблюдается визуально в виде свечения образца, а также регистрируется с помощью волоконного спектрометра. Распространение сгенерированного излучения в волокне было описано с применением модели динамической дифракции на двумерном фотонном кристалле и учитывало отражение от нижней грани фотонного кристалла.

В дальнейшем планируется проведение более полного исследования эффективности генерации второй гармоники на данной микроструктуре в зависимости от геометрии угла падения излучения на основной частоте.

#### *Список литературы*

1. Асадчиков В.Е., Бедин С.А., Васильев А.Б. и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2022. № 3. С. 10.
2. Коновко А.А., Андреев А.В., Березкин В.В. и др. // Кристаллография. 2025. Т. 70 (4). С. 698-704.
3. Beloglazov V.I., et al. // Tech. Phys. Lett. 2005. 2005. V. 31. No. 12. P. 1019-1021.

М.В. ВИНОКУРОВ, Р.А. ХАБИБУЛЛИН

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

## **ВЛИЯНИЕ ШИРИНЫ ТЕРАГЕРЦОВОГО КВАНТОВО-КАСКАДНОГО ЛАЗЕРА С РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ НА ЕГО СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

Проведено моделирование и рассчитан спектр терагерцовых квантово-каскадных лазеров с распределённой обратной связью (РОС), сформированной за счёт периодического изменения ширины боковых границ двойного металлического волновода. Построена зависимость положения резонансной частоты от пределов изменения ширины лазерного волновода и с помощью моделирования продемонстрировано затухание поля в уширенных частях с увеличением пределов изменения ширины волновода.

M.V. VINOKUROV, R.A. KHABIBULLIN

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

## **IMPACT OF THE RIDGE WIDTH ON THE SPECTRAL PROPERTIES OF A TERAHERTZ DISTRIBUTED-FEEDBACK QUANTUM-CASCADE LASER**

Simulation was performed and the spectrum was calculated for terahertz quantum-cascade lasers with a distributed feedback (DFB) structure, formed by the periodic modulation of the sidewall width in a double-metal waveguide. The dependence of the resonant frequency position on the range of the laser waveguide width modulation was plotted, and the simulation demonstrated the attenuation of the field in the widened sections as the range of the waveguide width modulation increases.

Терагерцовые квантово-каскадные лазеры (ТГц ККЛ) открывают перспективы для регистрации интенсивных линий поглощения (ЛП) таких молекул, как фтороводород [1], изотопологи воды [2] и атомарный кислород [3]. Для использования лазера в спектрометрических исследованиях, на него накладывается требование генерации в одночастотном режиме, чего можно достичь с помощью распределённой обратной связи (РОС), сформированной за счёт периодического изменения ширины волновода [4]. Однако, не всегда удастся точно попасть в окрестность ЛП, покрываемую перестройкой ККЛ. Решением

данной проблемы служит создание линейки ТГц ККЛ с различными пределами изменения ширины лазерного волновода.

Целью данной работы являлось исследование положения брэгговской частоты от ширины волновода  $W_{\min}$ . Для четырёх периодов РОС  $\Lambda = 17.0, 17.5, 18.0$  и  $18.5$  мкм рассчитывался спектр [5], из которого находилось положение резонансной частоты для разных значений  $W_{\min}$ . Отметим, что для всех геометрий выполнялось соотношение  $W_{\min} = 5/3 W_{\max}$ . Полученные результаты показывают, что увеличение ширины волновода смещает резонансную частоту в более длинноволновую область (рис. 1).

Отметим, что увеличивать ширину можно лишь до некоторого порогового значения. В силу того, что поле в уширенной части уменьшается (рис. 2), дальнейшее увеличение будет ослаблять селективное действие гофрированных границ и спектр лазера будет аналогичен спектру полоскового ККЛ. Тем не менее, подбирая период РОС и диапазон ширин волновода, можно покрывать интересующий спектрометрический диапазон с разной дискретизацией. Для  $\Lambda = 17$  мкм и  $W_{\min}$ , меняющейся в диапазоне от 36.5 до 43.0 мкм, скорость перестройки составила  $\vartheta = 11.6$  ГГц/мкм, в то время как для  $\Lambda = 18.5$  мкм и диапазона ширин 30.0 - 33.5 мкм её значение почти втрое больше:  $\vartheta = 31.3$  ГГц/мкм.

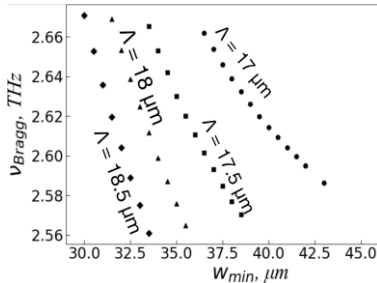


Рис. 1. Зависимость положения брэгговской частоты от ширины лазерного волновода для различных периодов РОС

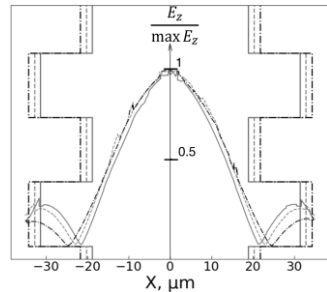


Рис. 2. Затухание поля в уширенной части волновода с увеличением ширины волновода для  $\Lambda = 17.0$  мкм

#### Список литературы

1. Coxon J.A., Hajigeorgiou P.G. // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2014. V. 151. P. 133-154.
2. Kyuberis A.A., Zobov N.F., Naumenko O.V., et al. // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2017. V. 203. P. 175-185.
3. Hübers H., Richter H., Graf U.U., et al. // Nature Communications. 2023. V. 14(1).
4. Williams B.S., et al. // Optics Letters. 2005. V. 30. No. 21. P. 2909-2911.
5. Винокуров М.В., Хабибуллин Р.А. // XI Международная конференция «Лаз-2025»: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2025. С. 71.

В.С. БЕЛЯЕВА<sup>1,2</sup>, Д.А. ЧЕРМОШЕНЦЕВ<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Российский квантовый центр, Сколково*

<sup>2</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

<sup>3</sup>*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный*

## **ОСОБЕННОСТИ РЕЖИМА ЗАТЯГИВАНИЯ В ИНТЕГРАЛЬНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ МИКРОРЕЗОНАТОРАХ С УЧЁТОМ ТОРЦЕВЫХ ОТРАЖЕНИЙ ВОЛНОВОДА**

Эффект затягивания излучения лазерного диода на высокодобротный микрорезонатор зарекомендовал себя как эффективный метод стабилизации частоты. Интегральные кольцевые микрорезонаторы являются перспективной платформой для реализации компактных узкополосных источников. В данной работе анализируется процесс затягивания в схеме с микрокольцевым резонатором, связанным с волноводом, торцы которого формируют резонатор Фабри–Перо.

V.S. BELIAEVA<sup>1,2</sup>, D.A. CHERMOSHENTSEV<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Russian Quantum Center, Skolkovo*

<sup>2</sup>*Lomonosov Moscow State University*

<sup>3</sup>*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny*

## **FEATURES OF SELF-INJECTION LOCKING IN INTEGRATED MICRORESONATOR RINGS CONSIDERING WAVEGUIDE FACET REFLECTIONS**

The effect of a laser diode self-injection locking to a high-quality-factor microresonator has demonstrated its effectiveness for frequency stabilization. Integrated microring resonators are a promising platform for realizing compact narrow-linewidth laser sources. In this work we investigate the self-injection locking in a coupled system of an integrated microring resonator and a waveguide Fabry–Perot cavity formed by reflective facets.

Лазерные диоды востребованы в науке и технике благодаря своей компактности и низкой стоимости [1]. Затягивание частоты диодного лазерного источника на высокодобротный резонатор доказало эффективность для частотной стабилизации излучения [2]. Особую актуальность приобретает использование интегральных микрокольцевых резонаторов (МКР), что обусловлено развитием литографии и доступностью фотонных интегральных чипов [3]. В них отражение от

торцов волновода возникает естественным образом, неизбежно формируя резонатор Фабри–Перо, связанный с микрокольцом [4].

В работе был проведён теоретический анализ эффекта затягивания частоты лазера на микрорезонатор посредством связующего элемента, границы которого образуют резонатор Фабри–Перо. Исследованы кривые затягивания для связанной системы интегрального МКР и резонатора Фабри–Перо в волноводе – пример таких кривых для изолированного МКР (красная) и связанного с резонатором Фабри–Перо (синяя) показан на рис. 1. Оранжевой линией обозначена частотная характеристика лазера без обратной связи. Показано, что благодаря резонатору Фабри–Перо появляются дополнительные параметры для управления стабилизацией. Установлено, что корректное позиционирование микрорезонатора относительно торцов волновода может существенно улучшить характеристики системы по сравнению с изолированным МКР.

Численно доказано, что оптимизация коэффициентов отражения границ связующего элемента позволяет увеличить коэффициент стабилизации более чем в два раза. Полученные результаты открывают новые возможности для проектирования сложных резонаторных систем и управления нелинейными эффектами.

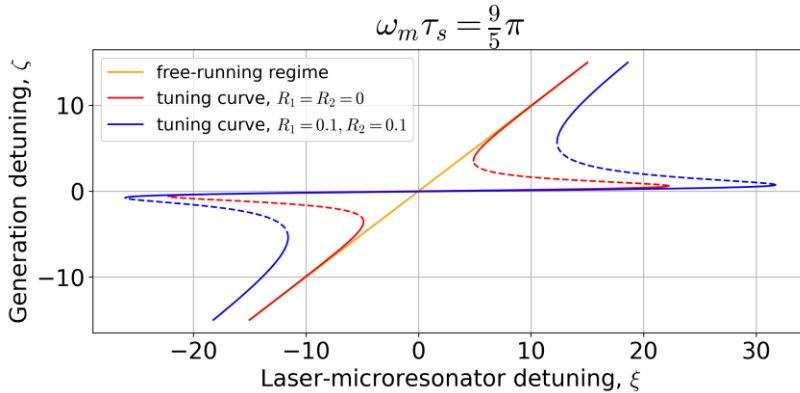


Рис. 1. Перестроенная кривая затягивания для начального фазового сдвига, равного  $9/5\pi$

#### Список литературы

1. Sciamanna M., Shore K.A. // Nat. Photonics. 2015. V. 9 (3). P. 151-162.
2. Oraevsky A.N., Yarovsky A.V., et al. // Quantum Electron. 2001. V. 31 (10). P. 897.
3. Jin W., et al. // Nat. Photonics. 2021. V. 15 (5). P. 346-353.
4. Gao M., et al. // Nat. Commun. 2022. V. 13 (1). P. 3323.

Д.В. ВИНОГРАДОВ<sup>1</sup>, Д.А. БЕЛОВ<sup>1,2</sup>, А.В. ИКОННИКОВ<sup>1,2</sup>,  
Р.А. ХАБИБУЛЛИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

<sup>2</sup>Московский государственный университет

## **МИКРОДИСКОВЫЕ КВАНТОВО-КАСКАДНЫЕ ЛАЗЕРЫ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА НА МОДАХ ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ**

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование терагерцовых квантово-каскадных лазеров (ТГц ККЛ) на основе микродискового резонатора с модами шепчущей галереи (МШГ). Моделирование распределения полей для МШГ позволило найти моды с наибольшей интенсивностью излучения для разных диаметров микродисков. Проведённое моделирование хорошо согласуется с измеренными спектрами генерации ТГц ККЛ.

D.V. VINOGRADOV<sup>1</sup>, D.A. BELOV<sup>1,2</sup>, A.V. IKONNIKOV<sup>1,2</sup>,  
R.A. KHABIBULLIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University

## **MICRODISK TERAHERTZ QUANTUM CASCADE LASERS BASED ON WHISPERING GALLERY MODES**

Theoretical and experimental studies of terahertz quantum cascade lasers (THz QCLs) based on a microdisk resonator with whispering gallery modes (WGMs) have been carried out. Modeling of the field distribution for WGMs has allowed us to find modes with the highest radiation intensity for different microdisk diameters. The modeling is in good agreement with the measured THz QCL generation spectra.

Лазеры на микродисках, основанные на модах шепчущей галереи (МШГ), привлекают значительное внимание благодаря своим уникальным высокодобротным модам, которые циркулируют по кругу резонатора, распространяясь под скользящими углами.

В работе рассматриваются два микродисковых терагерцовых квантово-каскадных лазера (ТГц ККЛ) с диаметрами 50 и 100 мкм и высотой (толщина активной области GaAs/AlGaAs) равной 15.3 мкм. Поле внутри микродиска может быть найдено с помощью скалярного уравнения Гельмгольца, записанного в цилиндрических координатах:

$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial E}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E}{\partial \phi^2} + k^2 E = 0$ , решением которого будет функция:  $E(r, \phi, z) = J_m(r\sqrt{k^2 - \beta^2})e^{\pm im\phi \pm i\beta z}$ ,  $\beta$  – постоянная распространения вдоль оси  $z$ , но так как мы ищем собственные моды резонатора, которые не зависят от  $z$  ( $\beta = 0$ ) [1], таким образом:  $E_r = C_0 J_m \left( \frac{2\pi nr}{\lambda_{m,q}} \right) e^{im\phi}$  [2]. Длины волн таких собственных мод можно вычислить по формуле:  $\lambda_{m,q} = \frac{2\pi R n}{T_{m,q}}$ , где  $R$  – радиус цилиндра,  $n$  – показатель преломления среды резонатора ( $n = 3.7 \neq n(\lambda)$ ),  $T_{m,q}$  – корни порядка  $q$  функции Бесселя с индексом  $m$ . При помощи Comsol Multiphysics были найдены собственные длины волн и проведён расчёт полей, соответствующих этим длинам волн. Интегрирование плотности излучательной энергии по боковой поверхности цилиндра позволяет определить вклад моды в интегральный оптический сигнал, измеряемый внешним детектором. На рис. 1 представлены результаты численного моделирования и экспериментальные спектры генерации микродискового ТГц ККЛ, а на рис. 2 его ВАХ и ВтАХ характеристики для микродиска диаметром 50 мкм. Таким образом, были исследованы спектры генерации микродисковых ТГц ККЛ с различным диаметром и найдены моды МШГ, вносящие наибольший вклад в оптический сигнал.

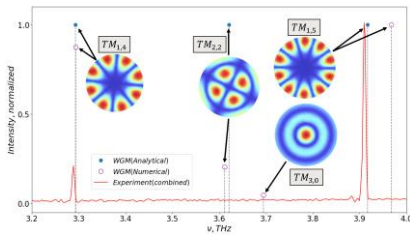


Рис. 1. Результаты моделирования и измеренные спектры генерации микродискового ТГц ККЛ диаметром 50 мкм

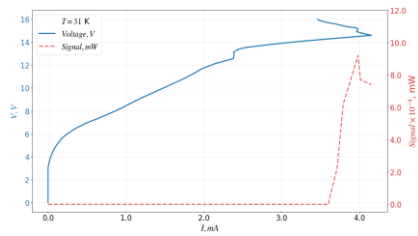


Рис. 2. ВАХ и ВтАХ характеристики микродискового ТГц ККЛ диаметром 50 мкм

#### Список литературы

1. Крыжановская Н.В., Максимов М.В., Жуков А.Е. Лазеры на основе квантовых точек и микрорезонаторов с модами шепчущей галереи // Квантовая электроника. 2014. Т. 44. № 3. С. 189-200.
2. Fasching G., et al. Subwavelength microdisk and microring terahertz quantum-cascade lasers // IEEE journal of quantum electronics. 2007. V. 43. No. 8. P. 687-697.



А.Н. ГОЛОДУХИНА<sup>1,2</sup>, В.С. БЕЛЯЕВА<sup>1,2</sup>, А.Е. ШИТИКОВ<sup>1</sup>,  
Д.А. ЧЕРМОШЕНЦЕВ<sup>1,3</sup>, Н.Ю. ДМИТРИЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Российский квантовый центр, Сколково*

<sup>2</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

<sup>3</sup>*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный*

## **ДИНАМИКА ЛАЗЕРНОГО ДИОДА В РЕЖИМЕ ЗАТЯГИВАНИЯ ЧАСТОТЫ В СИСТЕМЕ С ДВУМЯ ОПТИЧЕСКИМИ МИКРОРЕЗОНАТОРАМИ**

При генерации керровских частотных гребёнок в режиме затягивания частоты лазера на частоту микрорезонатора в большинстве случаев используется один источник накачки и один микрорезонатор. В нашей работе один источник накачки одновременно возбуждает моды двух кольцевых резонаторов, расположенных на единой интегральной платформе, что открывает новые возможности по генерации двойной гребёнки на одном интегральном чипе.

A.N. GOLODUKHINA<sup>1,2</sup>, V.S. BELIAEVA<sup>1,2</sup>, A.E. SHITIKOV<sup>1</sup>,  
D.A. CHERMOSHENTSEV<sup>1</sup>, N.Yu. DMITRIEV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Russian Quantum Centre, Skolkovo*

<sup>2</sup>*Lomonosov Moscow State University*

<sup>3</sup>*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny*

## **DYNAMICS OF LASER DIODE IN SIL REGIME IN A SYSTEM WITH TWO OPTICAL MICRORESONATORS**

One pump source and one microresonator are usually used for Kerr frequency comb generation in self-injection locking (SIL) regime. In our work, one pump source simultaneously excites the modes of two ring microresonators located on a single integrated platform, that opens up new possibilities of generating dual frequency combs on one platform.

Керровские частотные гребёнки позволяют измерять оптические частоты с рекордно высокой точностью и находят приложение в спектроскопии, метрологии, интегральной фотонике и аэрокосмической инженерии [1]. Одним из наиболее эффективных способов генерации подобных гребёнок является накачка высокодобротного микрорезонатора с керровской нелинейностью постоянным лазерным излучением. За счёт четырёхволнового смешения фотоны накачки перераспределяются между модами резонатора, формируя тем самым оптическую частотную гребёнку

[2]. Эффект затягивания частоты лазерного источника без изолятора на частоту микрорезонатора позволяет значительно подавить фазовый шум и существенно сузить ширину спектральной линии излучения [3].

В большинстве случаев в оптической схеме используется один источник излучения и один микрорезонатор. В данной работе мы усложнили систему и взяли в качестве источника накачки DFB-лазер, который затянули одновременно на два несвязанных микрорезонатора на одном чипе (рис. 1). Кольцевые резонаторы изготовлены из нитрида кремния, их диаметр соответствует области свободной дисперсии порядка 150 ГГц. Излучение заводится в систему торцевым методом (непосредственным подведением диода встык к чипу) и разделяется в многомодовом интерферометре на два пучка равной интенсивности. За счёт системы нагревателей на каждом из колец есть возможность тонкой регулировки температуры и, таким образом, эффективной резонансной частоты.

В ходе эксперимента мы регулировали собственные частоты резонансов колец и входили в режим затягивания частоты диода одновременно на два кольца. Такой подход позволил получить новые режимы, а именно: генерацию гребёнки на боковой линии накачки; одновременную генерацию двух оптических гребёнок на центральной линии; возникновение двух параллельных процессов четырёхволнового смешения. Таким образом, в нашей работе были обнаружены и исследованы новые режимы затягивания лазерного диода на систему из двух колец. Это существенно расширяет область применения эффекта затягивания частоты и даёт возможности для дальнейшего создания компактных источников двойной гребёнки.

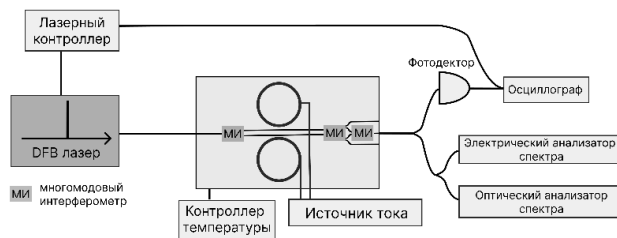


Рис. 1. Схема установки

#### Список литературы

1. Chembo Y.K. // Nanophotonics. 2016. V. 5. No. 2. P. 214-230.
2. Herr T., Hartinger K., Riemensberger J., et al. // Nature Photon. 2012. V. 6. P. 480-487.
3. Kondratiev N.M., Lobanov V.E., Cherenkov A.V., Voloshin A.S., Pavlov N.G., Koptyaev S., Gorodetsky M. L. // Optics Express. 2017. V. 25. P. 28167-28178.

А.А. БОРМИНЦЕВ<sup>1</sup>, Р.И. ШАЙДУЛЛИН<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

<sup>2</sup>Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕКАЧКИ МНОГОМОДОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СВЕТОВОДАХ С БОКОВОЙ НАКАЧКОЙ**

В работе исследована температурная зависимость коэффициента перекачки многомодового излучения в DSCCP (distributed side-coupled cladding-pumped) волокне. Эксперименты проводились в широком температурном диапазоне на образцах активных (легированных ионами Yb<sup>3+</sup>) и пассивных многомодовых световодов. Для анализа влияния механических и термооптических эффектов на коэффициент перекачки сравнивались две конфигурации волокна: прямолинейная и свернутая в компактный блок.

A.A. BORMINTSEV<sup>1</sup>, R.I. SHAIDULLIN<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

<sup>2</sup>Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS

## **INVESTIGATION OF THERMAL CHANGES IN MULTIMODE RADIATION TRANSFER COEFFICIENTS IN SIDE-PUMPED OPTICAL FIBERS**

The paper investigates the temperature dependence of the multimode radiation transfer coefficient in a DSCCP (distributed side-coupled clustering-pumped) fiber. The experiments were carried out over a wide temperature range on samples of active (doped with Yb<sup>3+</sup> ions) and passive multimode optical fibers. To analyze the effect of mechanical and thermo-optical effects on the pumping coefficient, two fiber configurations were compared: rectilinear and folded into a compact block.

Эффективность перераспределения накачки в двойном DSCCP-волокне определяет как необходимую длину волокна, так и КПД лазера. В процессе генерации мощного лазерного излучения волокно нагревается, а эффективность перекачки излучения многомодовой накачки между световодами существенно зависит от температуры [1, 2], что приводит к уменьшению поглощения мощности накачки.

В работе рассмотрена температурная зависимость коэффициентов перекачки излучения длиной волны ~ 962 нм в DSCCP-волокне с двумя

пассивными световодами на основе полиметилсилоксанового (PDMS) полимера. Коэффициенты определялись экспериментально двухдиодным методом [3]. По температурным зависимостям (рис. 1) видно, что у сильно изогнутого волокна (радиус кривизны  $\sim 5$  см), помещённого в металлический блок, зависимость при низких температурах схожа с прямым волокном, но резкое снижение эффективности перекачки начинается раньше: уже при  $100^\circ\text{C}$  против  $140^\circ\text{C}$  для прямого. Вероятно, это связано с механическими напряжениями в изогнутых участках, способствующими расхождению световодов при меньшей температуре [4].

Дополнительно исследовалось волокно с активной сердцевиной, легированной иттербием. Экспериментально определены коэффициент поглощения накачки (который составил  $0.23\text{ м}^{-1}$  и не зависел от температуры в диапазоне  $25 - 180^\circ\text{C}$ ) и потери на разведённом участке двойного волокна. Это позволило численно смоделировать распределение излучения и оценить коэффициенты перекачки. Температурные зависимости этих коэффициентов для активного волокна оказались аналогичны пассивному (рис. 1): механические напряжения также снижают термостойкость изогнутого волокна.

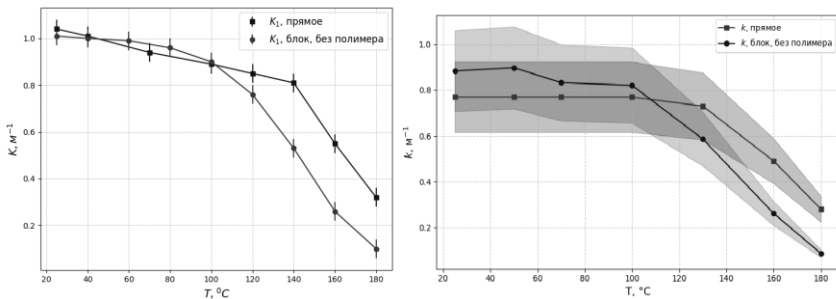


Рис. 1. Сравнение температурных зависимостей эффективности перекачки прямолинейной и свернутой в блок конфигурации для пассивного волокна (слева), активного волокна (справа)

#### Список литературы

1. Huang Z., et al. // Optical Fiber Technology 2013. V. 19, P. 293-297.
2. Slobozhanina M.G., Slobozhanin A.N., Bochkov A.V., et al. // Optical Fiber Technology. 2018. V. 45. P. 363-367.
3. Shaidullin R., Dolgov V., Kuranov I., Ryabushkin O. // 2024 ICLO, Saint Petersburg, 2024. P. 63.
4. Chmielowiec A., Wo's W., Gumieniak J. // Materials. 2021. V. 14. P. 6060.

И.И. БОРОДЫНКИН, С.Б. БЫЧКОВ<sup>1</sup>, К.В. ЗАЯЦ<sup>1</sup>, А.Р. ИШТЕЕВ<sup>2</sup>,  
В.С. КОНДРАТЕНКО, С.В. ТИХОМИРОВ<sup>1</sup>

*МИРЭА – Российский технологический университет, Москва*

*<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических  
измерений, Москва*

*<sup>2</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,  
Москва*

## **ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ КАЛОРИМЕТРИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ МОЩНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПРИЁМНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ ИЗ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НА КРЕМНИЕВОЙ ПОДЛОЖКЕ**

Приведено описание конструкции высокочувствительного теплового измерительного преобразователя мощности лазерного излучения в волокне с использованием отечественной технологической базы. Разработана технология изготовления термочувствительного элемента. Показано, что применение углеродных нанотрубок на кремниевой подложке в качестве поглощающего слоя увеличивает спектральную чувствительность более чем на 20 % и расширяет диапазон измерений от 100 мкВт до 100 мВт. Приведены результаты исследования метрологических характеристик.

I.I. BORODYNKIN, S.B. BYCHKOV<sup>1</sup>, K.V. ZAYATS<sup>1</sup>,  
A.R. ISHTEEV<sup>2</sup>, V.S. KONDRATENKO, S.V. TIKHOMIROV<sup>1</sup>

*MIREA – Russian Technological University, Moscow*

*<sup>1</sup>All-Russian Scientific Research Institute for Optical and Physical Measurements,  
Moscow*

*<sup>2</sup>National University of Science and Technology MISIS, Moscow*

## **HIGH SENSITIVE LASER POWER METER BASED ON THERMAL SENSOR WITH ABSORBER CARBON NANOTUBES ON SILICON SUBSTRATE**

This paper describes the design of a highly sensitive laser power meter which using local technology. A technology for manufacturing a thermal sensor has been developed. It is shown that the use of carbon nanotubes on a silicon substrate as an absorbing substrate increases spectral sensitivity by more 20 % and expands the measurement range from 100  $\mu$ W to 100 mW. The results of a study of the metrological parameters are presented.

В рамках совершенствования эталонной базы ФГБУ «ВНИИОФИ» был разработан высокочувствительный калориметрический измерительный преобразователь для средств измерений (СИ) мощности оптического излучения в волокне.

Традиционно в преобразователях мощности, предназначенные для эталонов, используются полостные приёмные элементы, позволяющие получить высокую степень черноты в широком спектральном диапазоне [1]. Основным их недостатком является инерционность, связанная с продолжительным нестационарным нагревом приёмного элемента. В разработанном СИ использовался чувствительный элемент с плоской приёмной площадкой, позволяющей уменьшить постоянную времени, а высокая степень черноты и неселективность по длине волны достигается за счёт применения покрытия из углеродных нанотрубок (УНТ). Для этого был решён ряд технологических проблем. Чувствительный элемент преобразователя представляет собой массив плёночных термопар медь-никель на полиимидной подложке, полученных методом вакуумного магнетронного осаждения тонких металлических плёнок на подложку, что обеспечило высокую чувствительность в 80 мкВ/мВт. Покрытие из массива вертикально ориентированных УНТ, выращенных на кремниевой подложке для последующего трансфера на полиимидную подложку, позволяет достигнуть поглощения на уровне 99,94 % в широком диапазоне длин волн от 0,4 до 10,6 мкм. Рабочий диапазон мощностей преобразователя составляет от 100 мкВт до 100 мВт.

Совокупность технических решений позволила получить постоянную времени преобразования мощности в 4 с, нехарактерную для эталонных СИ, тем самым уменьшить время воспроизведения и придачу единицы мощности, подавить составляющую погрешности, связанную с нестабильностью мощности лазерного излучения.

*Список литературы*

1. Глазов А.И., Козаченко М.Л. Тихомиров С.В., Хатыров Н.П. // Измерительная техника. 2016. № 3. С. 7-11.

Д.В. МОРОЗОВ<sup>1,2</sup>, А.К. ВОРОБЬЕВ<sup>1,2</sup>, Н.Ю. ДМИТРИЕВ<sup>1</sup>,  
А.Е. ШИТИКОВ<sup>1</sup>, Д.А. ЧЕРМОШЕНЦЕВ<sup>1,2</sup>, И.А. БИЛЕНКО<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Российский квантовый центр, Сколково*

<sup>2</sup>*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный*

<sup>3</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

## **ГЕНЕРАЦИЯ НИЗКОШУМНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЧАСТОТНЫХ ГРЕБЁНОК НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ ИЗ НИТРИДА КРЕМНИЯ**

Исследуется генерация оптических частотных гребёнок в интегральных микрорезонаторах из нитрида кремния с нормальной дисперсией групповой скорости. Выявлено, что при особых оптимальных значениях отстройки накачки от моды микрорезонатора достигается значительное снижение фазового шума частотной гребёнки по сравнению с другими режимами генерации.

D.V. MOROZOV<sup>1,2</sup>, A.K. VOROBYEV<sup>1,2</sup>, N.Yu. DMITRIEV<sup>1</sup>,  
A.E. SHITIKOV<sup>1</sup>, D.A. CHERMOSHENTSEV<sup>1,2</sup>, I.A. BILENKO<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Russian Quantum Centre, Skolkovo*

<sup>2</sup>*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny*

<sup>3</sup>*Lomonosov Moscow State University*

## **LOW-NOISE MICROCOMB GENERATION IN INTEGRATED SILICON NITRIDE OPTICAL MICRORESONATORS**

The generation of optical frequency combs in integrated silicon nitride microresonators with normal group velocity dispersion is investigated. It is found that, with specific optimal pumping offset settings from the microresonator mode, the phase noise of the frequency comb is reduced compared to other generation modes.

Интегральные микрорезонаторы (МР) из нитрида кремния Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> являются перспективной платформой для создания компактных источников оптических частотных гребёнок (ОЧГ) благодаря сочетанию сверхвысокой добротности  $Q \sim 10^6 - 10^7$ , керровской нелинейности и малого модового объёма. Одним из перспективных направлений является генерация микроволновых сигналов путём регистрации сигнала биений линий ОЧГ [1]. Такой метод генерации позволяет генерировать сигналы в ГГц диапазоне, отличающиеся высоким уровнем стабильности и низким уровнем шумов. Данная работа направлена на выявление оптимальных

экспериментальных параметров, обеспечивающих снижение фазового шума (ФШ) между линиями ОЧГ на основе МР.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1а. Исследуется генерация ОЧГ с частотным интервалом  $f_{\text{rep}} = 21.3$  ГГц лазерным диодом (ЛД) с распределённой обратной связью, работающим в режиме затягивания на моды МР. Используется интегральный МР с межмодовым интервалом 21.3 ГГц, нормальной дисперсией групповой скорости  $\beta_2 = 849$  пс<sup>2</sup>/км и добротностью  $Q = 8.2 \times 10^6$ . Для измерения ФШ микроволнового сигнала используется быстрый фотодетектор (ФД) и электронный спектроанализатор (АС).

Выявлено, что частотный интервал  $f_{\text{rep}}$  генерируемой ОЧГ зависит от частотной отстройки накачки от моды МР и может варьироваться в малом диапазоне  $\pm 1$  МГц подстройкой тока ЛД  $I_{\text{LD}}$ . Характерная зависимость  $f_{\text{rep}}(I_{\text{LD}})$  представлена на рис. 1б. Для различных значений тока  $I_{\text{LD}}$  экспериментально измерена спектральная плотность мощности (СПМ) фазового шума СВЧ-сигнала на ФД. Выявлено, что в точках экстремума ( $df_{\text{rep}} / dI_{\text{LD}} = 0$ ) СПМ фазового шума снижается на величину до 14 дБ, и достигает значений 63 мкрад<sup>2</sup>/Гц и 2.5 нрад<sup>2</sup>/Гц на временах усреднения 1 и 0.1 мс соответственно.

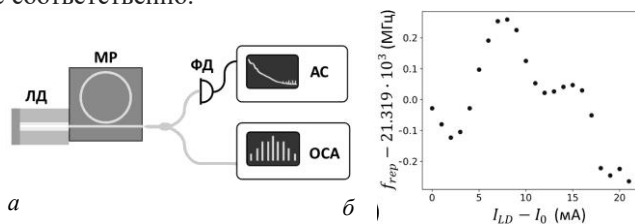


Рис. 1. Экспериментальная установка: МР – микрорезонатор, ЛД – лазерный диод, ФД – фотодиод, ОСА – оптический анализатор спектра, АС – электронный спектроанализатор (а), зависимость  $f_{\text{rep}}$  от отстройки тока лазерного диода (б)

Таким образом, в данном исследовании демонстрируется методика снижения фазового шума ОЧГ на основе МР, что может быть использовано при разработке компактных СВЧ-генераторов на основе МР.

Работа выполнена при поддержке Госкорпорации «Росатом» в рамках выполнения Дорожной карты «Квантовые вычисления» (Договор № 868/1759-Д от 03.10.2025).

#### Список литературы

1. Lihachev G., et al. Platicon microcomb generation using laser self-injection locking // Nature communications. 2022. V. 13. No. 1. P. 1771.



Т.А. МАКОВЕЦКАЯ, Ю. ХУНСЮНЬ, Л.Д. ЗАВАЛИШИНА,  
А.А. МАРКВАРТ, Н.А. УШАКОВ

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

## **ПРИМЕНЕНИЕ КВАНТОВО-ВДОХНОВЛЕННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ОПРОСА РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ВИБРАЦИЙ**

В последнее время широко обсуждается применение неклассического излучения, в частности, бифотонов для реализации высокоточных измерений. Однако, низкая скорость генерации и детектирования бифотонов, а также низкая доступность такой аппаратуры препятствует их практическому внедрению. Тем не менее, в ряде работ была показана эквивалентность между бифотонами и тепловым излучением с точки зрения когерентности второго порядка. В работе сравниваются различные источники излучения, обладающие сверхпуассоновской статистикой флуктуаций интенсивности и рассматривается возможность их применения в распределённых волоконно-оптических датчиках вибраций для улучшения пространственного разрешения и предела минимально обнаружимых деформаций, а также расширения рабочего диапазона частот.

T.A. MAKOVETSKAYA, Y. HONGQUN, L.D. ZAVALISHINA,  
A.A. MARKVART, N.A. USHAKOV

*Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University*

## **APPLICATION OF QUANTUM-INSPIRED INTERFEROMETRY FOR INTERROGATION OF DISTRIBUTED FIBER-OPTIC VIBRATION SENSORS**

Recently, the use of non-classical radiation, particularly biphotons, for high-precision measurements has been widely discussed. However, the low generation and detection rates of biphotons, as well as the limited availability of such equipment, hinder their practical implementation. Nevertheless, several studies have demonstrated the equivalence between biphotons and thermal radiation in terms of second-order coherence. This work compares various radiation sources that exhibit super-Poissonian intensity fluctuation statistics and examines the possibility of using such sources in distributed fiber-optic vibration sensors to improve spatial resolution, enhance the minimum detectable strain sensitivity, and expand the operational frequency range.

Распределённые волоконно-оптические датчики (РВОД) вибраций крайне актуальны для решения важных задач в нефтегазовой области, геофизике, мониторинге состояния зданий и сооружений и многих других

[1]. В основе большинства таких датчиков лежат принципы интерферометрии, из-за чего выходной сигнал подвержен влиянию шумов частоты зондирующего лазера, что ограничивает возможность регистрации низкочастотных сигналов. С другой стороны, локализация воздействия в РВОД основана на временной рефлектометрии, из-за чего максимальная частота регистрируемых сигналов обратно пропорциональна максимальной протяженности чувствительного волокна, а минимальная детектируемая амплитуда воздействия ухудшается при улучшении пространственного разрешения.

Применение методов квантовой оптики в интерферометрии привело к ряду значимых достижений [2], однако, большинство данных методов крайне восприимчивы к потерям излучения. В РВОД ослабление зондирующего излучения может быть значительным (до 40 дБ), что делает их несовместимыми с существующими методами квантовой оптики. В данной работе предложен подход создания излучения с суперпуассоновской статистикой флуктуаций интенсивности при помощи модуляции классического излучения по интенсивности. Экспериментально продемонстрировано наблюдение интерференции второго порядка при использовании как когерентного лазера, так и суперлюминисцентного диода в качестве модулируемого источника, при этом когерентность второго порядка определялась только параметрами модуляции и не зависела от когерентности источника.

С использованием разработанного источника излучения продемонстрирован опрос РВОД длиной чувствительного волокна длиной 1 км, при этом частота регистрируемых воздействий достигала 200 кГц и была ограничена выходной мощностью источника излучения. Кроме этого, благодаря тому, что целевой сигнал датчика формировался за счёт интерференции второго порядка, экспериментально достигнутый нижний порог шумов имел равномерный уровень менее 1 мкрад/ $\sqrt{\text{Гц}}$  в полосе частот от 0.1 Гц до 100 кГц и не зависел от спектра частотных шумов модулируемого источника излучения.

Другим преимуществом предложенного подхода является возможность независимо управлять как максимальной длиной опрашиваемого чувствительного волокна, так и максимальной частотой регистрируемых колебаний за счёт выбора параметров обработки сигналов.

Работа поддержана грантом РНФ 23-72-10095.

#### *Список литературы*

1. Gorshkov B., et.al. // Sensors. 2022. V. 22. P. 1033.
2. Shih Y. An Introduction to Quantum Optics: Photon and Biphoton Physics. 2021.

**В.В. ГРИШАЧЕВ**

*Российский государственный гуманитарный университет,  
Институт информационных наук и технологий безопасности, Москва*

## **НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ШУМЫ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО КАНАЛА И БОРЬБА С НИМИ**

Распространение сигнала в оптических кабельных системах сопровождаются помехами и искажениями, влияющие на эффективность работы. Выявление природы и параметров шумов позволяет предложить методы борьбы с ними.

**V.V. GRISHACHEV**

*Institute for Information Sciences and Security Technologies  
Russian State University of the Humanities, Moscow*

## **LOW-FREQUENCY FIBER-OPTIC CHANNEL NOISE AND ITS CONTROL**

Signal propagation in optical cable systems is accompanied by interference and distortion, affecting operational efficiency. Identifying the nature and parameters of noise allows us to propose methods to combat them.

Возникновение шумов в волоконно-оптическом (ВО) канале связывается с искажениями оптического сигнала при распространении, вследствие взаимодействия со средой при воздействии внешних фоновых физических полей. Вкладами от сторонних оптических источников (помехи) можно пренебречь – защитные оболочки волокна и кабеля их полностью экранируют. Оценка качества ВО-канала производится по коэффициенту шума  $CNL = SNR_0/SNR$ , где отношение среднеквадратичной мощности сигнала ( $S$ ) к шуму ( $N$ ) на входе  $SNR_0$  к значению на выходе  $SNR$  канала. При распространении происходит ослабление сигнала с коэффициентом затухания  $\alpha$  и искажение сигнала, вызывающее рост доли мультипликативных шумов из-за декорреляции с основным сигналом искаженной части, который определяется коэффициентом декорреляции  $\chi$ .

Коэффициент можно определить как  $\chi = -(dS/dl)/S$ , то есть подобно коэффициенту затухания  $\alpha$ . В случае постоянства  $\chi = \chi_0$  по прохождении расстояния  $L$  коэффициент шума  $CNL = \exp(\chi_0 L) + SNR_0[\exp(\chi_0 L) - 1]$ . В высококачественном одномодовом волокне с преобладающим симметричным рассеянии Рэлея можно принять  $\chi = \alpha$ . Коэффициент  $\chi$

сильно зависит от спектра шумов. В природе преобладают шумы  $1/f$ , что приводит к незначительному влиянию на работу высокочастотных ВО-систем связи, но оказывающий значительное влияние на работу низкочастотных акустических ВО-систем, таких как ВО-системы охраны периметра, ВО-микрофоны, каналы утечки речевой информации через ВО каналы и другие. Отличительная черта низкочастотных искажений является продолжительное время корреляции с информационным сигналом равно  $\tau = 1/f$ , что для оптического сигнала, распространяющегося со скоростью  $c/n = 2 \cdot 10^8$  м/сек, соответствует проходному расстоянию  $L = c/nf$ : для  $f = 10$  кГц (звук) равно 20 км и для  $f = 100$  Гц (вибрации) равно 200 км. Повысить SNR при регистрации можно вычитанием низкочастотных шумов – дифференциальным зондированием. Наиболее эффективно дифференциальное зондирование проводится методами OTDR (рис. 1).

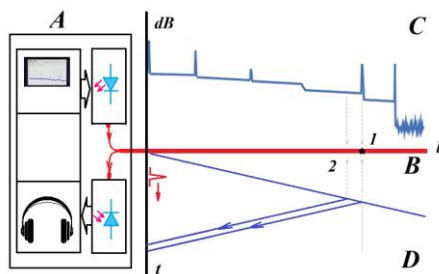


Рис. 1. Рефлектометр с системой анализа рефлектограмм в реальном времени и акустическим выводом (А), оптоволокно с точками формирования информативного (1) и шумового (2) сигналов (В), рефлектограмма оптоволокна (С), временная диаграмма распространения оптического импульса (D)

В структуре дифференциального зондирования оптической рефлектометрии проводится программное сравнение разделённых во времени и пространстве сигналов 1 и 2, которые одинаково зашумлены на всем участке до 1 и различаются вкладами шумов только от участка 1 - 2 на расстояниях  $L$  от рефлектометра до контролируемого участка ВО-канала. В других схемах зондирования, например, на прохождение также можно подавить низкочастотные шумы путём сравнения каналов, отличающихся чувствительностью на одном локальном участке. Данная схема шумоподавления проверена экспериментально [1].

#### Список литературы

1. Гришачев В.В. // Фотоника. 2025. Т. 19 (6). С. 486.499.

А.А. ЗЫКИНА, С.А. ПЛЯСЦОВ  
*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

**РЕФРАКТИВНЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК  
КАЧЕСТВА ТОПЛИВА НА ОСНОВЕ  
ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСА  
И СТРУКТУРЫ MMF-SMF-MMF ВОЛОКНА**

Работа посвящена разработке и исследованию рефрактивного волоконно-оптического датчика качества топлива, основанного на эффекте поверхностного плазмонного резонанса (ППР) и структуре соединения MMF-SMF-MMF волокна с дополнительным диэлектрическим покрытием. Проведённые моделирование и экспериментальная апробация показали высокую чувствительность датчика и возможность надёжного различения типов топлива по спектральным характеристикам ППР.

A.A. ZYKINA, S.A. PLYASTSOV  
*ITMO University, Saint-Petersburg*

**REFRACTIVE FIBER-OPTIC FUEL QUALITY SENSOR  
BASED ON SURFACE PLASMON RESONANCE  
AND MMF-SMF-MMF FIBER STRUCTURE**

The work is devoted to the development and investigation of a refractive fiber-optic fuel quality sensor based on the surface plasmon resonance (SPR) effect and an MMF-SMF-MMF fiber structure with an additional dielectric coating. The performed modeling and experimental validation demonstrated high sensor sensitivity and reliable differentiation of fuel types based on the spectral characteristics of SPR.

Работа посвящена разработке рефрактивного волоконно-оптического датчика качества дизельного топлива на основе поверхностного плазмонного резонанса (ППР). В качестве чувствительного элемента используется структура MMF-SMF-MMF с многослойным металлическим и диэлектрическим покрытием.

Целью исследования является повышение чувствительности ППР-датчика и обеспечение возможности детектирования небольших изменений показателя преломления, характерных для различных типов дизельного топлива.

Для анализа влияния параметров покрытия было выполнено математическое моделирование чувствительного элемента с

использованием матричного метода [1, 2]. Смоделированы спектры ППР для различных толщин металлического слоя ( $Al$  20 нм) и диэлектрического покрытия ( $Al_2O_3$  5 нм). Результаты моделирования показали, что такая конфигурация обеспечивает резонанс в области, соответствующей показателям преломления дизельного топлива (1,395 - 1,415).

Экспериментальный чувствительный элемент был изготовлен методом сварки участков MMF и SMF волокна с последующим нанесением покрытия  $Cr/Al/Al_2O_3$ . Спектры пропускания зарегистрированы с использованием галогенового источника и портативного спектрометра. Проведены измерения 50 образцов дизельного топлива, различающихся по плотности и типу (летнее/зимнее). На основе анализа второй производной спектральных кривых были определены характеристические длины волн ППР.

Полученные результаты демонстрируют отсутствие линейной зависимости между показателем преломления и плотностью топлива, однако наблюдаются устойчивые тенденции, позволяющие классифицировать образцы. Летнее дизельное топливо характеризуется более высокими значениями показателя преломления и характерной длины волны ППР ( $> 550$  нм), в то время как зимнее имеет более низкие значения ( $< 520$  нм). Средняя чувствительность разработанного датчика составляет 13300 нм / RIU.

Предложенная конструкция ППР-датчика обладает высокой потенциальной применимостью для экспресс-анализа качества дизельного топлива, идентификации типа и обнаружения фальсификаций в производственных и полевых условиях.

#### *Список литературы*

1. Виноградов С.В., Кононов М.А. Расчет параметров многослойной структуры при резонансном возбуждении поверхностных плазмонов // Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. № 4. С. 343-348.
2. Зыкина А.А., Плясов С.А., Гладских И.А. Повышение чувствительности рефрактивного волоконно-оптического датчика на основе поверхностного плазмонного резонанса и MMF-SMF-MMF структуры с помощью диэлектрических покрытий // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25. № 2. С. 222-228.

А.Т. ТУРОВ<sup>1,2</sup>, В.В. КРИШТОП<sup>1,3</sup>, Ю.А. КОНСТАНТИНОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет

<sup>2</sup>Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН

<sup>3</sup>Пермская научно-производственная приборостроительная компания

## **ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ РАСПРЕДЕЛЁННЫЙ АКУСТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК И ЕГО ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ АДАПТАЦИЯ ДЛЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ**

Приведены результаты исследования алгоритмов шумоподавления в данных волоконно-оптических акустических датчиков и сравнения акустической чувствительности различных видов оптических волокон. Проведены успешные испытания датчика – зарегистрирован акустический след единичного биологического объекта и локализован с точностью до 300 мкм по радиальной координате и 180 градусов по угловой.

A.T. TUROV<sup>1,2</sup>, V.V. KRISHTOP<sup>1,3</sup>, Yu.A. KONSTANTINOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Perm National Research Polytechnic University

<sup>2</sup>Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the RAS

<sup>3</sup>Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company

## **FIBER OPTIC DISTRIBUTED ACOUSTIC SENSOR HARDWARE AND SOFTWARE ADAPTATION FOR BIOLOGICAL APPLICATIONS**

The results of a study of noise suppression algorithms for fiber-optic acoustic sensor data and a comparison of the acoustic sensitivity of different types of optical fibers are presented. Successful sensor testing was conducted, recording the acoustic signature of a single biological object and localizing it with an accuracy of up to 300 μm in radial coordinates and 180 degrees in angular coordinates.

Волоконно-оптические датчики являются популярным инструментом распределённого акустического мониторинга во многих отраслях. Развитие новых применений требует адаптации их характеристик и снижения стоимости [1]. С этой целью авторами был разработан и протестирован лабораторный прототип такого датчика для биологических применений [2].

Для компенсации падения качества выходных данных при упрощении и снижении стоимости установки была создана и протестирована

комбинация хорошо известных и новых нетребовательных к вычислительным ресурсам алгоритмов шумоподавления, позволяющая достигнуть повышения отношения сигнал-шум на величину до 10,8 дБ [3].

Также была разработана специальная установка и с её помощью изучена относительная акустическая чувствительность шесть видов специальных оптических волокон и SMF-28 в качестве эталона для сравнения. Анализ результатов позволяет выделить волокна, наилучшим образом подходящие для конкретного применения (рис. 1) [4].

Предлагаемая конструкция волоконно-оптического распределённого акустического датчика была дополнена разработанным авторами чувствительным элементом в виде 200 м волокна, плотно спирально уложенного на плоской виниловой пластинке. В таком виде установка позволила успешно зарегистрировать акустический след единичной особи мадагаскарского шипящего таракана (*Gromphadorhina portentosa*) и локализовать его на плоскости с точностью по радиальной координате в 300 мкм и по угловой в 180 градусов. Полученные данные хорошо согласуются с данными другой исследовательской группы [5] и данными, записанными микрофоном классической конструкции (рис. 2) [6].

Работа выполнена в рамках государственного задания № 122031100058-3.

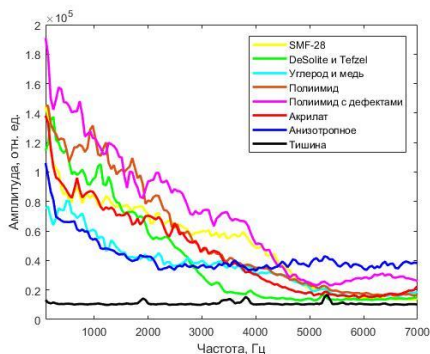


Рис. 1. Сравнение акустической чувствительности

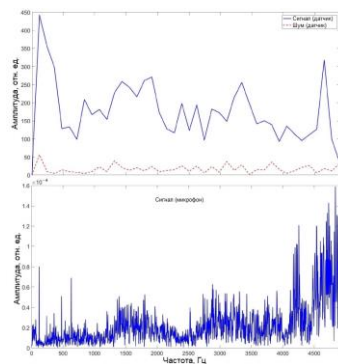


Рис. 2. Регистрация акустического следа биобъекта

#### Список литературы

1. Ashry I., et al. // Scientific reports. 2020. V. 10 (1). P. 3155.
2. Тузов А.Т. и др. // Прикладная фотоника. 2021. Т. 8 (2). С. 33-43.
3. Тузов А.Т., et al. // Algorithms. 2023. V. 16 (9). P. 440.
4. Тузов А.Т., et al. // Applied Sciences. 2024. V. 14 (22). P. 10147.
5. Clark D.C., Moore A.J. // Behaviour. 1995. V. 132 (5-6). P. 401-417.
6. Тузов А.Т., et al. // Sensors. 2025. V. 25 (7). P. 2101.



Л.Д. ЗАВАЛИШИНА, А.А. МАРКВАРТ, О.Г. БОБЫЛЕВА,  
А.Л. ГРАЖДЯН, В.Д. ФИЛОНОВ, Л.Б. ЛЮКУМОВИЧ,  
Н.А. УШАКОВ

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

## **ОТКЛИК МЕЖМОДОВОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА НА ОСНОВЕ SNS-СТРУКТУРЫ НА ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ**

Представлены результаты теоретического расчёта межмодового волоконно-оптического интерферометра на основе SNS-структуры в диапазоне концентраций водного раствора глицерина от 0 до 40 % и в диапазоне температур от 10 до 30 °С.

L.D. ZAVALISHINA, A.A. MARKVART, O.G. BOBYLEVA,  
A.L. GRAZHDIAN, V.D. FILONOV, L.B. LIKUMOVICH,  
N.A. USHAKOV

*Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University*

## **RESPONSE OF A INTERMODE FIBER-OPTIC INTERFEROMETER BASED ON AN SNS-STRUCTURE TO CHANGES IN EXTERNAL ENVIRONMENT PARAMETERS**

The results of a theoretical analysis of a intermode fiber-optic interferometer based on an SNS-structure are presented for aqueous glycerol solutions in the concentration range of 0 to 40 % and the temperature range of 10 to 30 °C.

Межмодовые волоконно-оптические интерферометры (МВИ) в последнее время представляют все больший интерес благодаря возможности применения в качестве датчиков температуры и показателя преломления внешней среды. Такие МВИ формируются путём сварки подводящих одномодовых волокон с одной или несколькими секциями оптических волокон разных типов [1], в которых может распространяться множество мод. Эффект, лежащий в основе построения датчика параметров внешней среды заключается том, что при внешнем воздействии на МВИ изменяется разность фаз мод в многомодовом световоде, и, следовательно, интенсивность света, прошедшая через оптоволоконную структуру. Метод опроса такого интерферометра обычно основан на анализе его спектральной характеристики (СХ) – зависимости

коэффициента пропускания от длины волны, которая изменяется при воздействии на МВИ. Как правило, в литературе рассматриваются короткие структуры, порядка нескольких сантиметров в длину, что не позволяет выделить отдельные гармонические компоненты СХ, обусловленные попарной интерференцией множества возбуждённых в чувствительном световоде мод. Однако их анализ может быть полезен для увеличения динамического диапазона измерений, осуществления одновременных измерений нескольких величин, для оценки модового состава, возбуждённого в реальной волоконной структуре. В данной работе был проведён такой анализ для наиболее простого МВИ – на основе SNS-структуры (singlemode-no-core-singlemode). Для выделения отдельных интерференционных компонент была подобрана длина бессердцевинного (БС) оптоволокна в один метр. Расчёт СХ SNS-структуры был проведён в диапазоне концентраций от 0 до 40 % водного раствора глицерина, что соответствует диапазону показателя преломления 1.3162 - 1.3734, и в диапазоне температур от 10 до 30 °С, при этом были использованы теоретические выражения для постоянных распространения и коэффициентов возбуждения мод БС секции из работы [2]. Подход, используемый нами для анализа отклика МВИ на внешние воздействия, заключается в применении дискретного преобразования Фурье к СХ МВИ, при этом положения максимумов на фурье-образе соответствуют частотам осцилляций гармонических компонент вдоль оси длин волн, а аргумент фурье-образа в каждом максимуме – частоте и начальной фазе, чувствительным к внешним воздействиям. В результате были рассчитаны чувствительности этих аргументов фурье-образа для гармонических компонент, которые составили: от 0.07 до 4 рад/% к концентрации глицерина, (что соответствует чувствительности к показателю преломления в диапазоне 53 - 3049 рад/RIU (refractive index unit)), и к температуре – от  $0.9 \cdot 10^{-3}$  до 0.05 рад/°С. Как и ожидалось, гармонические компоненты, образованные интерференцией мод более высокого порядка, имеют большую чувствительность. Также была оценена возможность одновременного измерения показателя преломления и температуры с помощью SNS-структуры. Было выявлено, что эти два воздействия трудно различимы ввиду превалирования термооптического эффекта над эффектом теплового расширения оптоволокна.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-72-10095.

#### *Список литературы*

1. Wang K., et al. // IEEE Sensors J. 2021. V. 21. No 1. P. 132-142.
2. Xu W., et al. // Sensors. 2017. V. 17. No. 10. P. 2240.

С.В. ВЛАСОВ<sup>1,2</sup>, А.Д. ИВАНОВ<sup>1</sup>, И.В. МАЛЫШЕВ<sup>1</sup>,  
М.В. ПОПОВ<sup>1</sup>, Д.А. ЧЕРМОШЕНЦЕВ<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Российский квантовый центр, Сколково

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

<sup>3</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

## ТАКТИЛЬНЫЕ СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ ТЕЙПЕРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

Представлены прототипы тактильных сенсоров на основе тейперных оптических волокон, в том числе многоканальных. Продемонстрировано их пространственное разрешение, способность определять проскальзывание захваченного предмета. Исследован эффект периодической пространственной зависимости чувствительности сенсора.

S.V. VLASOV<sup>1,2</sup>, A.D. IVANOV<sup>1</sup>, I.V. MALYSHEV<sup>1</sup>, M.V. POPOV<sup>1</sup>,  
D.A. CHERMOSHENTSEV<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Russian Quantum Center, Skolkovo

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

<sup>3</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

## TAPERED OPTICAL FIBER TACTILE SENSORS

Presents a tapered optical fiber tactile sensors prototypes, including multichannel ones. Their spatial resolution and grasped object slip detection capabilities were demonstrated. The effect of periodic spatial dependence of sensor sensitivity was investigated.

При использовании роботизированных манипуляторов под управлением алгоритмов искусственного интеллекта важную роль играют тактильные данные, для получения которых в последнее время активно разрабатываются тактильные сенсоры. Использование таких сенсоров значительно повышает вероятность успеха алгоритмов при проведении сложных манипуляций [1]. Для использования в задачах манипуляций к тактильному сенсору выдвигается ряд требований по чувствительности, скорости отклика, временному и пространственному разрешениям, а также способностью определять проскальзывание захваченного предмета.

В данной работе описаны успехи по созданию тактильного сенсора на основе тейперных (растянутых) оптических волокон. Тейперное волокно является оптическим волокном с участком уменьшенного диаметра, где

значительная часть излучения распространяется в оболочке или снаружи волокна, что делает его чувствительным к внешним воздействиям [2, 3]. В предыдущей работе [4] уже был показан прототип сенсора, работающий за счёт измерения изменения оптического пропускания тейперного волокна, погружённого в слой эластомера (схематически изображён на рис. 1), исследован его отклик на различные нагрузки.

Для получения пространственного разрешения был создан прототип многоканального сенсора на основе сетки из тейперных волокон. Представлен алгоритм для оценки пятна контакта сенсора с захваченным предметом на основе сигналов сенсора. Предлагаемая схема обладает широкими возможностями масштабирования при увеличении площади сенсора. Также, использование нескольких слоёв тейперных волокон расположенных на разной глубине позволяет увеличить диапазон чувствительности сенсора так, что у первого слоя диапазон может быть от 1 до 30 гс (грамм силы), у второго – от 7 до 200 гс, у третьего – от 75 до 600 гс, у четвёртого – от 200 до 900 гс. Исследован эффект периодической пространственной зависимости чувствительности сенсора, вызванный межмодовыми взаимодействиями в волокне, показано усиление эффекта при нагрузке на сенсор в двух разных точках одновременно. Процессы межмодовых взаимодействий в тейперном волокне также были смоделированы в коммерческом пакете программ Lumerical.

Исследовалась способность сенсора реагировать на проскальзывание захваченного предмета, что является важным свойством тактильного сенсора. Показаны увеличение падения пропускания при продольном воздействии на поверхность сенсора, а также способность сенсора определять вибрации, возникающие при проскальзывании.

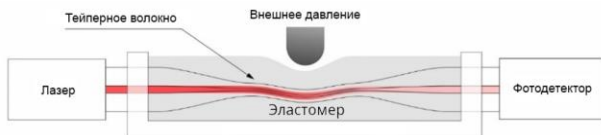


Рис. 1. Схематическое изображение прототипа сенсора

#### *Список литературы*

1. Lin T., Zhang Y., et al. // 2025 IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation (ICRA). – IEEE, 2025. P. 5637-5643.
2. Tong L. Micro/nanofibre optical sensors: challenges and prospects // Sensors. 2018. V. 18. No. 3. P. 903.
3. Brambilla G., Xu F., et al. Optical fiber nanowires and microwires: fabrication and applications // Advances in Optics and Photonics. 2009. V. 1. No. 1. P. 107-161.
4. Власов С.В., Иванов А.В., и др. Тактильные сенсоры на основе оптических микроволокон // XIII Межд. конф. по фотонике и информационной оптике. 2024. С. 181-182.

И.В. ГАЛАКТИОНОВ<sup>1,2</sup>, В.В. ТОПОРОВСКИЙ<sup>1</sup>,  
О.В. КОЛЕСНИКОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский технический университет связи и информатики

<sup>2</sup>Московский политехнический университет

## **МЕТОДЫ ФОКУСИРОВКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ВОЛОКНО ДЛЯ ЗАДАЧ БЕСПРОВОДНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ**

В работе представлен разработанный алгоритм фокусировки излучения в волокно с линейной временной и пространственной сложностью и низкой чувствительностью к изменениям входных параметров. Разработанный подход с переключением режимов позволяет использовать стохастическую составляющую алгоритма в качестве быстрого механизма грубой настройки, в то время как составляющая градиентного спуска используется в качестве более медленного, более точного метода точной настройки. Этот двухрежимный формат работы особенно актуален в сценариях, где отсутствуют быстрые динамические искажения волнового фронта. Результаты показали, что предложенный алгоритм значительно увеличил плотность мощности пучка, проходящего через диафрагму диаметром 10 мкм, имитирующую сердцевину волокна диаметром 10 мкм, увеличив её с 0,33 до 2,3 мВт. Кроме того, остаточная среднеквадратичная абберация (RMS) уменьшилась с 0,63 до 0,12 мкм, что может потенциально увеличить эффективность связи с 0,1 до 0,6.

I.V. GALAKTIONOV<sup>1,2</sup>, V.V. TOPOROVSKY<sup>1</sup>, O.V. KOLESNIKOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Moscow Technical University of Communications and Informatics

<sup>2</sup>Moscow Polytechnic University

## **METHODS FOR LASER BEAM FOCUSING TO A FIBER FOR WIRELESS OPTICS COMMUNICATIONS**

This paper presents a developed fiber focusing algorithm with linear temporal and spatial complexity and low sensitivity to input parameter changes. The developed mode-switching approach allows the stochastic component of the algorithm to be used as a fast coarse-tuning mechanism, while the gradient descent component is used as a slower, more accurate fine-tuning method. This dual-mode operation format is particularly relevant in scenarios where fast dynamic wavefront distortions are absent. The results showed that the proposed algorithm significantly increased the beam power density passing through a 10- $\mu$ m-diameter aperture simulating a 10- $\mu$ m-diameter fiber core, increasing it from 0.33 to 2.3 mW. In addition, the residual root-mean-square (RMS) aberration decreased from 0.63 to 0.12  $\mu$ m, which can potentially increase the coupling efficiency from 0.1 to 0.6.

В последние годы связь в свободном пространстве (FSO) привлекла значительное внимание, становясь все более популярной в самых разных областях применения, от защищённой связи между сторонами [1 - 4] до обмена данными между летательными аппаратами и наземными станциями [5 - 7]. Однако постоянной проблемой в области квантовой связи остается эффективное распределение квантовых состояний на больших расстояниях. В данной работе был представлен подход, направленный на решение этих проблем путём разработки комбинированного алгоритма оптимизации на основе стохастического градиентного спуска, специально предназначенного для компенсации оптических искажений лазерных пучков. Был разработан и протестирован алгоритм, показана его эффективность и надёжность. На рис. 1 представлена экспериментальная схема, собранная для тестирования алгоритма.

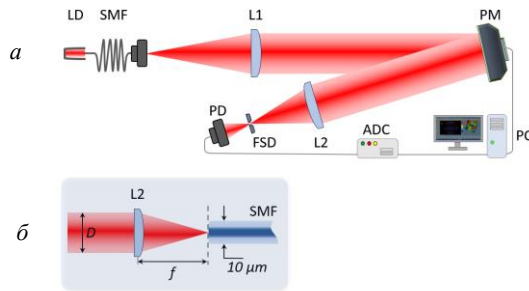


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Результаты показали, что предложенный алгоритм значительно увеличил плотность мощности пучка, проходящего через диафрагму диаметром 10 мкм, имитирующую сердцевину волокна диаметром 10 мкм, увеличив её с 0,33 до 2,3 мВт. Кроме того, остаточная среднеквадратичная aberrация (RMS) уменьшилась с 0,63 до 0,12 мкм, что может потенциально увеличить эффективность связи с 0,1 до 0,6.

#### Список литературы

1. Barros R. // Proc. SPIE. 2014. V. 92421. P. 92421.
2. Bertocchi G. // Journal of Physics B. 2006. V. 39 (5). P. 1011.
3. Galaktionov I. // Proc. SPIE. 2021. V. 11672. P. 1167214.
4. Galaktionov I. // Proc. SPIE. 2018. V. 10772. P. 10772.
5. Hong CK. // Physical Review Letters. 1987. V. 59 (18). P. 2044.
6. Kim Y. // Physical Review Letters. 2001. V. 86 (7). P. 1370.
7. Moll F. // Proc. SPIE. 2013.

З.А. ЕРОВЕНКО, А.В. ПЕТРОВ, А.А. МАРКВАРТ, Н.А. УШАКОВ  
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

## **УЛУЧШЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ СПЕЦИАЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН**

Свойства оптических волокон тесно связаны с их геометрическими размерами и свойствами материалов, из которых они изготовлены. Особенно актуальна задача контроля внутренней структуры специальных оптических волокон, таких как волокна с несколькими оболочками, тейпированные и линзованные волокна, а также сварные соединения различных волокон. В настоящее время для решения данной задачи применяются микроскопические методы, однако, с её помощью затруднительно получение трёхмерных изображений, а также оценка показателя преломления. В работе предложено развитие методов оптической когерентной томографии, обеспечивающее пространственную разрешающую способность порядка 3 - 4 мкм за счёт совместной обработки интерференционных сигналов, полученных в разных спектральных диапазонах.

Z.A. EROVENKO, A.V. PETROV, A.A. MARKVART,  
N.A. USHAKOV

*Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University*

## **IMPROVING THE SPATIAL RESOLUTION OF OPTICAL COHERENCE TOMOGRAPHY FOR VISUALIZING THE INTERNAL STRUCTURE OF SPECIAL OPTICAL FIBERS**

The properties of optical fibers are closely related to their geometric dimensions and the material characteristics from which they are manufactured. The task of inspecting the internal structure of special optical fibers, such as fibers with multiple claddings, tapered and lensed fibers, as well as splices of different fibers is particularly relevant. Currently, microscopic methods are used for this purpose; however, they make it difficult to obtain three-dimensional images and to evaluate the refractive index. This work proposes an advancement of optical coherence tomography methods that provides a spatial resolution on the order of 3 - 4  $\mu\text{m}$  by jointly processing interference signals obtained in different spectral ranges.

Оптическая когерентная томография (ОКТ) [1] позволяет неинвазивно получать трёхмерные изображения прозрачных и полупрозрачных объектов за счёт анализа зависимости интерференции света от длины

волны. Важным параметром ОКТ является пространственная разрешающая способность  $\Delta L$ , зависящая от параметров спектрального интервала, в котором измеряется интерференционный сигнал

$$\Delta L = k \lambda_0^2 / (2\Delta\lambda),$$

где  $\lambda_0$  – центральная длина волны,  $\Delta\lambda$  – ширина спектрального интервала, а коэффициент  $k$  имеет величину порядка единицы и связан с формой спектра используемого источника. В ряде задач требуется достижение  $\Delta L$  порядка нескольких мкм, при работе в инфракрасном диапазоне требуемая величина  $\Delta\lambda$  может достигать 300 - 400 нм, что сложно реализуемо с применением стандартной компонентной базы. Реализовать измерение спектрального интерференционного сигнала в широком диапазоне длин волн затруднительно с технической точки зрения.

В работе предложен подход улучшения пространственной разрешающей способности ОКТ при помощи регистрации и совместной обработки интерференционных сигналов в двух не граничащих спектральных интервалах. Для восстановления интерференционного сигнала в промежутке между измерительными спектральными интервалами применяется метод сингулярного спектрального анализа (ССА) [2]. Из измеренных интерференционных сигналов и начального приближения сигнала в промежутке между измерительными спектральными интервалами формируется вектор, к которому применяется разложение на сингулярные компоненты. Далее исходя из различных информационных критериев оценивается количество целевых сингулярных компонент, по которым вычисляется восстановленный сигнал. Данная процедура повторяется итерационно до достижения одного из определённых критериев сходимости. Как показано в ходе численного моделирования, сходимость сильно зависит от начального приближения сигнала в промежутке между измерительными спектральными интервалами.

Разработанный подход был успешно применён для реконструкции распределения показателя преломления места сварного соединения одномодового и многомодового волокон, а также для визуализации структуры тейпированных оптических волокон с диаметром сердцевины около 3 мкм и более.

Работа поддержана грантом РФФ 23-72-10095.

#### *Список литературы*

1. Huang D., Swanson E.A., et al. // Science. 1991. V. 254 (5035). P. 1178.
2. Golyandina N., et al. // J. Stat. Plan. Inference. 2007. V. 137 (8). P. 2642.



А.А. МАКОВЕЦКИЙ, С.М. ПОПОВ, Д.В. РЯХОВСКИЙ,  
А.А. ЗАМЯТИН

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

### **3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ «РЕЗОНАНСНЫХ» КОСЫХ ЛУЧЕЙ В СУЩЕСТВЕННО МНОГОМОДОВОМ ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ**

Проведено моделирование 3D-траекторий косых лучей в существенно многомодовом оптическом волокне (ОВ), установлены условия формирования «резонансных» траекторий. Экспериментально изучены свойства «резонансных» траекторий в кварц-кварцевых и кварц-полимерных ОВ с диаметром сердцевины 200 - 1000 мкм.

A.A. MAKOVETSKII, S.M. POPOV, D.V. RYAKHOVSKII,  
A.A. ZAMYATIN

*Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS*

### **3D-SIMULATION AND EXPERIMENTAL STUDY OF «RESONANT» OBLIQUE RAYS IN HIGHLY MULTIMODE OPTICAL FIBER**

3D trajectories of oblique rays in a highly multimode optical fiber (OF) were simulated, and the conditions for the formation of «resonant» trajectories were established. The properties of «resonant» trajectories in silica-silica and silica-polymer OFs with core diameters of 200 - 1000  $\mu\text{m}$  were experimentally studied.

Многомодовые кварцевые оптические волокна (ОВ) с диаметром световедущей сердцевины 200 - 1000 мкм широко используются в технологии и лазерной медицине. Косые лучи в таких ОВ известны давно, однако, их «резонансные» свойства исследованы недостаточно.

Алгоритм расчёта 3D-траекторий косых лучей и схема их возбуждения приведены в работе [1]. «Резонансные» траектории возбуждаются при величинах сдвига  $x_{k,m}$ , удовлетворяющих условию:

$$x_{k,m} = \sin\left(\frac{\pi}{2}\left(1 - 2 \times \frac{m}{k}\right)\right) \times R. \quad (1)$$

где  $k$  и  $m$  – целые взаимно простые числа, причём  $m \leq [k/2]$  (здесь  $[x]$  – целая часть  $x$ ),  $R$  – радиус сердцевины волокна.

На рис. 1 приведены рассчитанные характерные «резонансные» 3D-траектории для КП-ОВ с диаметром сердцевины 400 мкм. На рис. 2 в качестве примера приведены фото «резонансных» распределений поля на торце Кв-Кв / 1000 мкм для нескольких значений  $x_{k,m}$  (и соответствующих значений угла падения луча  $\varphi$ ).

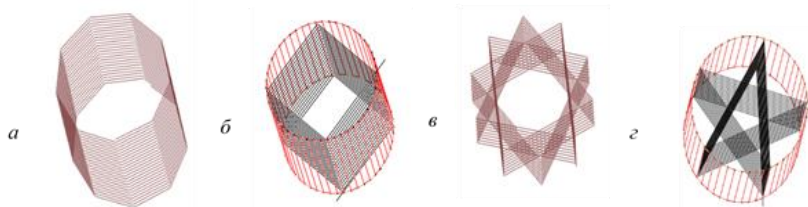


Рис. 1. «Резонансные» 3D-траектории косых лучей с проекциями:  
 правильный семиугольник ( $k = 7, m = 1$ ) (а),  
 правильный четырёхугольник ( $k = 4, m = 1$ ) (б),  
 неправильная десятиконечная звезда ( $k = 10, m = 3$ ) (в),  
 правильная пятиконечная звезда ( $k = 5, m = 2$ ) (з)

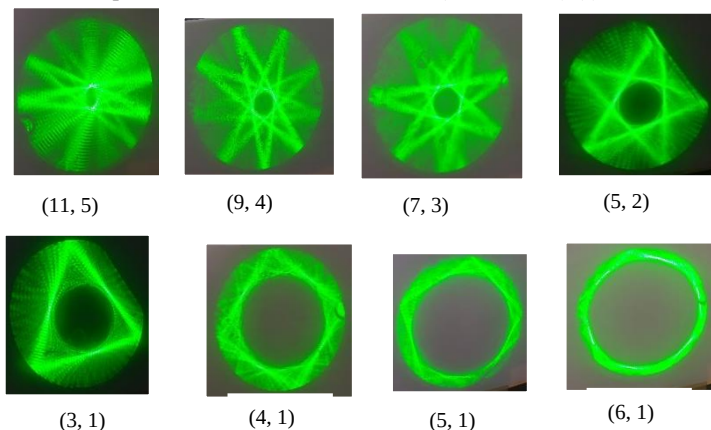


Рис. 2. Фото распределений интенсивности излучения на торце Кв-Кв / 1000 мкм / 0.24 / 14.0 см (ближнее поле), соответствующих различным «резонансным» траекториям;  $\lambda = 532$  нм, объектив – F 6.16 - 0.65

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

#### Список литературы

1. Маковецкий А.А., Попов С.М., Ряховский Д.В. Моделирование траекторий косых лучей в многомодовом тейперном оптическом волокне // Квантовая электроника. 2025. Т. 55. № 1. С. 23-30.

Д.В. КАЛЯЗИНА, Д.А. ВОЛЬНОВА, С.В. ВАРЖЕЛЬ,  
В.А. ЯКИМУК, Ю.И. ЯНДЫБАЕВА, А.А. МАГОМЕДОВА,  
А.А. ДМИТРИЕВ

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА АПОДИЗАЦИИ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЁТОК МЕТОДОМ ТРАНСЛЯЦИИ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА**

В данной работе продемонстрирован способ уменьшения боковых максимумов в спектре отражения волоконных брэгговских решёток (ВБР) с помощью аподизации профиля модуляции показателя преломления путём воздействия лазерным излучением с трансляцией пучка. Для ВБР длиной 40 мм и коэффициентом отражения более 99 % данный способ позволил подавить боковые максимумы более чем на 20 дБ.

D.V. KALIAZINA, D.A. VOLNOVA, S.V. VARZHEL, V.A. YAKIMUK,  
Yu.I. YANDYBAEVA, A.A. MAGOMEDOVA, A.A. DMITRIEV  
*ITMO University, Saint-Petersburg*

## **INVESTIGATION OF THE APODIZATION METHOD OF FIBER BRAGG GRATINGS BY LASER BEAM TRANSLATION**

In this work, we present a method for reducing side maxima in the reflection spectrum of the fiber Bragg gratings (FBG) by apodization of the refractive index modulation profile by exposure of the laser radiation with beam translation. For FBG with a length of 40 mm and a reflection coefficient of more than 99 %, this method made it possible to suppress side maxima by more than 20 dB.

Волоконные брэгговские решётки (ВБР) являются одним из ключевых элементов для узкополосной фильтрации в оптическом волокне. Узкополосная фильтрация оптического сигнала особенно актуальна в системах квантового распределения ключей [1], где даже незначительные искажения спектра влияют на достоверность и безопасность передачи информации. Для сглаживания формы спектра фильтра на ВБР необходимо уменьшать величину боковых максимумов в спектре отражения ВБР путём аподизации профиля модуляции показателя преломления. Одним из эффективных методов аподизации является постоблучение оптического волокна после записи ВБР [2]. С другой стороны, представляет интерес комбинация постоблучения с записью ВБР

методом фазовой маски с трансляцией лазерного пучка [3], который также позволяет производить аподизацию в процессе записи.

Целью работы является исследование уменьшения величины подавления боковых максимумов (SMSR) спектра ВБР путём аподизации с помощью постоблучения с трансляцией лазерного пучка.

Запись ВБР производилась в одномодовом оптическом волокне стандарта G.657.A2 методом фазовой маски с трансляцией пучка [3], источник излучения – эксимерный KrF-лазер COHERENT COMPexPro 102F ( $\lambda = 248$  нм). Запись осуществлялась с применением высокоточной линейной подвижки с ходом 100 мм и фазовой маски Ibsen Photonics с периодом 1071,5 нм ( $\pm 1$  порядок дифракции). Постоблучение производилось без использования фазовой маски, с правого и левого конца ВБР движущимся лазерным пучком. Схема процесса постоблучения приведена на рис. 1.

До постоблучения для ВБР длиной 40 мм, коэффициентом отражения 99,2 % и шириной 85 пм (по уровню -3 дБ) значение SMSR составляло 3,7 дБ. После постоблучения с параметрами  $E = 111$  мДж,  $f = 10$  Гц,  $v = 0,07$  мм/с было достигнуто значительное уменьшение бокового максимума (SMSR = 24,5 дБ), а также уменьшение ширины спектра до 75 пм (рис. 2). Таким образом, метод постоблучения ВБР с трансляцией пучка позволяет подавлять боковые максимумы на величину более 20 дБ.

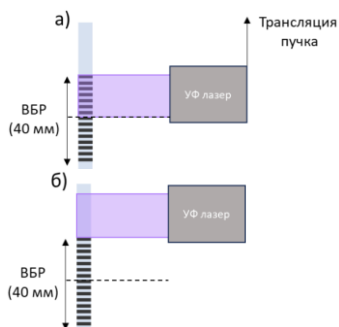


Рис. 1. Схема процесса и направления перемещения лазерного пучка при постоблучении в начальном (а) и конечном (б) положении пучка

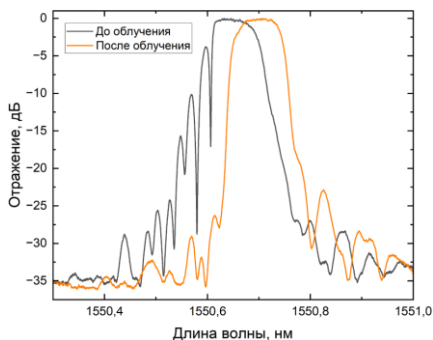


Рис. 2. Спектры ВБР до постоблучения (черный) и после (оранжевый)

#### Список литературы

1. Kynev S.M., et al. // Radiophysics and Quantum Electronics. 2024. V. 67 (1). P. 38-50.
2. Абдуллина С.Р. и др. // Квантовая электроника. 2006. Т. 36 (10). С. 966-970.
3. Yakimuk V.A., et al. // Optik. 2025. V. 323. P. 172216.

Д.П. СУДАС, П.И. КУЗНЕЦОВ

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

## **НАНЕСЕНИЕ НАНОПОКРЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТЬ ОПТОВОЛОКНА С НАКЛОННОЙ БРЭГГОВСКОЙ РЕШЁТКОЙ**

В настоящей работе проведено исследование процесса осаждения оксидов индия методом химического парофазного осаждения из металлоорганических соединений на поверхность кварцевого волоконного световода, внутри сердцевины которого записана наклонная брэгговская решётка. Покрытия толщиной до 1000 нм наносились при температурах от 160 до 400 °С с контролем оптических параметров записанной структуры. При нанесении определённой критической толщины покрытия возникал эффект резонанса затухающей моды и проявлялся в спектре пропускания. Комбинирование возможности выводить излучение из световедущей сердцевины при помощи наклонной решётки и эффекта возникающего резонанса в нанопокрывти позволяет расширить возможности использования полностью волоконных сенсорных комплексов.

D.P. SUDAS, P.I. KUZNETSOV

*Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS*

## **APPLICATION OF NANOCOATING TO THE SURFACE OF OPTICAL FIBER WITH A TILTED BRAGG GRATING**

In this work, we investigate the process of depositing indium oxide by chemical vapor deposition from organometallic compounds onto the surface of a quartz fiber light guide. Inside the core, a tilted Bragg grating is recorded. Coatings up to 1000 nanometers thick are applied at temperatures ranging from 160 to 400 °C, with control over the optical parameters of the recorded structure. When a critical coating thickness is reached, the effect of the lossy mode resonance occurs and manifests itself in the transmission spectrum. The ability to remove radiation from the light-conducting core using an inclined grating combined with the resulting resonance in the nano-coating makes it possible to expand the capabilities of fully fiber-based sensor systems.

Сенсорные системы, основанные на волоконных датчиках, активно используются во многих областях науки и техники [1]. В отдельный подкласс таких приборов относят измерители параметров жидких сред при помощи эффектов, связанных с наноматериалами. При создании условий взаимодействия оптического излучения из сердцевины волокна

наноматериалом будет наблюдаться эффект перекачки энергии в диапазоне, зависящем от оптической плотности окружающей среды. Таким образом будет наблюдаться резонанс затухающей моды [2], положение которого в спектре пропускания волоконного тракта будет смещаться при изменении параметров среды, в которой этот световод находится. При этом, для проявления такого взаимодействия необходимо локально изменить геометрию оптического волокна, из-за чего существенно снизится его прочность и границы применимости. Для решения этого фактора может быть использован брэгговский отражатель [3]. Наклонная решётка позволит вывести часть излучения, распространяющегося по волоконному тракту в нанесённое нанопокрывтие без изменения толщины оболочки световода.

Полученные результаты (рис. 1) дают подтверждение применимости использованного метода для формирования сложных комбинированных структур в оптическом волокне. Использование записанных ультрафиолетовым излучением наклонных 18 градусных решёток позволило добиться ширины рабочей области более 100 нм и при нанесённом покрытии оксида индия добиться увеличения чувствительности более чем в два раза от 500 до 1200 нм/единицу показателя преломления

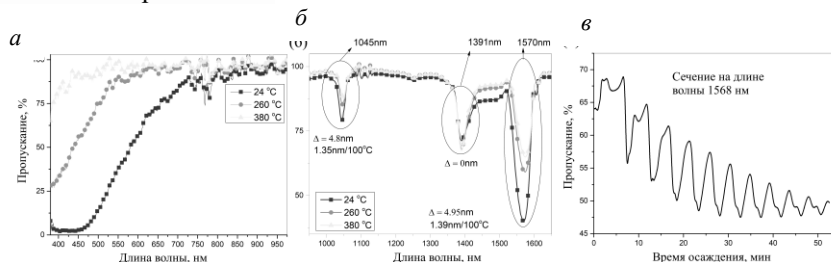


Рис. 1. Спектры пропускания оптического волокна с записанной брэгговской решёткой в процессе нанесения нанопокрывтия оксида индия: спектры пропускания при нагревании до температуры синтеза (а, б), зависимость пропускания на длине волны 1568 нм в процессе нанесения покрытия (в)

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 25-79-00301).

#### Список литературы

1. Lu N., et al. // Appl. Phys. Rev. 2019. V. 6. No. 4. P. 041302.
2. Savelyev E.A., Sudas D.P., Kuztestov P.I. // Opt. Lett. 2022. V. 47. P. 361-364.
3. Hu T., Zhao Y., Song A // Sens. Actuators B Chem. 2016. V. 237. P. 521-525.

С.Ю. ОТРОХОВ

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

## **ВОЛНОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ПРОФИЛЬ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ В ПЛАНАРНЫХ W-СВЕТОВОДАХ**

На основе численного решения дисперсионного уравнения исследованы характеристики мод плоского пятислойного W-световода в широком диапазоне изменения его параметров. Показано, что в наборе параметров, определяющих свойства W-световодов, особую роль играет ширина и показатель преломления промежуточного слоя. Надлежащим подбором параметров промежуточного слоя можно существенно расширить зону одномодового режима, оптимизировать размер основной моды, добиться высокой концентрации поля.

S.Yu. OTROKHOV

*Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS*

## **WAVE PARAMETERS AND REFRACTIV INDEX PROFILE IN PLANAR W- OPTICAL FIBERS**

Based on the numerical solution of the dispersion equation, the characteristics of the modes of a flat five-layer W- optical fibers have been investigated in a wide range of changes in its parameters. It has been shown that the width and refractive index of the intermediate layer play a special role in the set of parameters that determine the properties of W- optical fibers. By properly selecting the parameters of the intermediate layer, it is possible to significantly expand the single-mode regime, optimize the size of the fundamental mode, and achieve a high field concentration.

Световедущая структура плоского W-световода зависит от пяти параметров: трёх значений показателей преломления, причём  $n_1 > n_3 > n_2$  и величин  $a$  и  $b$ , определяющих ширину слоёв волновода (рис. 1). W-световоды по ряду характеристик намного эффективнее, чем стандартные световоды со ступенчатым показателем преломления [1, 2].

Цель работы – теоретическое исследование характеристик мод плоского пятислойного W-световода с разными значениями показателя преломления  $n_2$ . Для расчёта и построения графиков использованы результаты, полученные в [2]. Для наглядности результатов рассмотрен W-световод с редуцированным промежуточным слоем ( $n_1 = 1.456$ ,  $n_3 = 1.453$ ,  $a = 9.93$  мкм,  $b = 10$  мкм). Вид получаемых зависимостей имеет общий характер для любых плоских W-световодов (рис. 2 - 5).

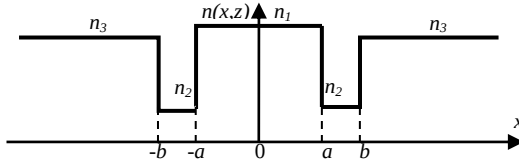


Рис. 1. Схема поперечного распределения показателя преломления в плоской пятислойной световедущей структуре

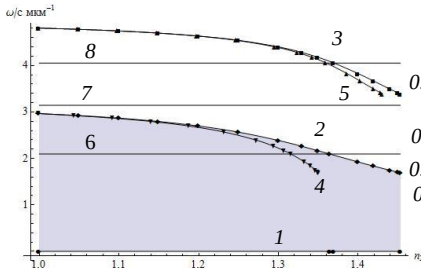


Рис. 2. Частоты отсечки основной (1), первой нечетной (2) и второй четной (3) мод W-световода, а также нижние границы переходных зон (кривые 4 и 5) в зависимости от  $n_2$  ( $1 \leq n_2 \leq n_3$ ), прямые 6, 7, 8 соответствуют длинам волн, соответственно  $\lambda = 3, 2, 1.55$  мкм

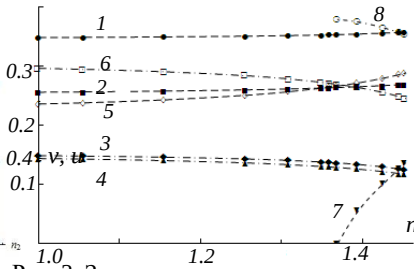


Рис. 3. Зависимости внешнего поперечного волнового числа  $v$  основной моды ( $\lambda = 1.55$  (1), 2 мкм (2)) и её внутреннего поперечного волнового числа  $u$  ( $\lambda = 1.55$  (3), 2 мкм (4)) а также внешнего и внутреннего волновых чисел первой нечетной ( $\lambda = 1.55$  мкм (5), (6) волн, соответственно  $\lambda = 3, 2, 1.55$  мкм и второй четной ( $\lambda = 1.55$  мкм (7), (8)) мод

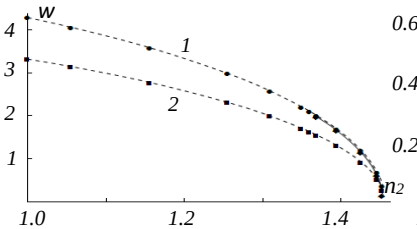


Рис. 4. Зависимость промежуточного поперечного волнового числа  $w$  основной моды ( $\lambda = 1.55$  (1), 2 мкм (2)) от  $n_2$

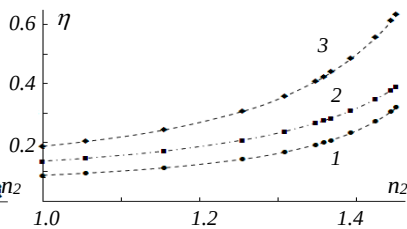


Рис. 5. Степень концентрации поля  $\eta$  основной моды ( $\lambda = 1.55$  (1), 2 мкм (2)) и первой нечетной моды ( $\lambda = 1.55$  (3)) от  $n_2$

Работа выполнена в рамках Госзадания № 075-00395-25-00 ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

#### Список литературы

1. Wadsworth W.J., et al. // IEEE Photonics Technology Lett. 2004. V. 16. No. 3. P. 843-845.
2. Отрохов С.Ю. и др. // Оптический журнал. 2014. Т. 81. № 1. С. 59-65.



**А.Ю БЫКОВСКИЙ**

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

**ЦЕЛЕВАЯ СЕТЬ СУБАГЕНТОВ НА БАЗЕ МНОГОЗНАЧНО-  
ЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИАЛОГОВОЙ  
КОММУНИКАЦИИ АГЕНТОВ**

Рассмотрен метод построения и верификации целевой сети внутренних подсистем/субагентов, формируемой в группе роботов для хранения и обмена ценной информацией. Схема основана на диалоговой модели обмена логическими сообщениями и объединяет базовую сеть агентов с целевой сетью внутренних субагентов, выделенных для решения локальной задачи.

**A.Yu. BYKOVSKY**

*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

**PURPOSE NETWORK OF SUBAGENTS,  
BASED ON MULTIPLE-VALUED LOGIC DIALOG MODEL  
OF AGENTS COMMUNICATIONS**

The method is considered for the design and verification of the purpose network of internal subsystems/subagents, formed in a group of robots to keep and exchange valuable data. The scheme is based on the dialog model of logic messages exchange, incorporating the basic net of agents with the purpose net of internal subagents, chosen to solve the local task.

Интенсивное развитие беспилотных роботов для транспорта, логистики, производства, городской инфраструктуры и медицинского сервиса вынуждает разрабатывать сложные схемы удалённой верификации [1] параметров агента и восстановления его работоспособности в случае поломки или успешной сетевой атаки. В этих целях целесообразно использовать альтернативные каналы связи и копии критических данных, сохранённые во внутренних подсистемах и внешних агентах. При этом преимущество использования дискретной многозначной логики [2] заключается в лёгкости построения многопараметрических моделей управления и схем диалогового общения роботов, не требующих сложных программ и языков высокого уровня.

Целью работы является исследование возможностей диалогового протокола целевого обмена данными во вспомогательной сети субагентов, образованной несколькими подсистемами одного или нескольких агентов.

Эти подсистемы образуют целевую сеть (purpose network) подчинённых субагентов (рис. 1), к которой при сбое переходит принятие решения.

Методика [2] основана на  $k$ -значной дискретной алгебре Аллена–Живона с набором операторов  $\{0, 1, \dots, k-1, \text{Literal}(a, b), \text{MIN}, \text{MAX}\}$ . Трёхуровневая модель мира группы роботов задается эквивалентными словарями терминов естественного языка  $\{w_{i,j}^L\}$ , кодов натуральных чисел  $\{w_{i,j}^N\}$  и МЗЛ-кодов  $\{w_{i,j}^K\}$  [2]. Используется единый протокол диалога и для базовых агентов, и для целевой сети субагентов.



Рис. 1. Принцип построения вспомогательной сети субагентов в группе роботов

Доступ к агентам, субагентам и их каналам связи регулируется комбинацией фиксированных паролей и одноразовых случайных кодов, получаемых роботом предпочтительно от квантовой линии распределения ключа при очередном доверенном подключении. Алгоритмы и технические решения рассмотрены на примере микроассемблерных подпрограмм для 8-битных микроконтроллеров (то есть уровня Интернета вещей), имеющих внешние SRAM и ROM.

Формирование предлагаемой целевой сети субагентов расширяет набор методов защиты роботов от сбоев и сетевых атак, использует стандартные каналы связи и не требует сложных специализированных программ, что особенно важно для массовых дешевых роботов.

#### Список литературы

1. Araujo H., et.al. // ACM Trans. Softw. Eng. Methodol. 2023, V. 32. P. 51.
2. Bykovsky A. // Appl. Sci. 2025. V. 3. No. 15. P. 2427.

С.В. ВАСИЛЬЕВ, И.С. СТЫРКИН

*Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, Воронеж***ПОИСК ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛЯ ЦИРКУЛЯЦИИ  
ФАЗОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ИЗОБРАЖЕНИЯ**

Предложен подход к обнаружению объектов, основанный на анализе циркуляции векторного поля фазоэнергетического спектра изображения, объединяющего достоинства энергетического и фазочастотного пространственного спектров сигнала. Получены аналитические выражения для циркуляции фазоэнергетического спектра вдоль замкнутого прямоугольного контура.

S.V. VASILYEV, I.S. STYRKIN

*Air Forces Academy named after Prof. N.E. Zhukovskiy and Yu.A. Gagarin, Voronezh***SEARCHING FOR OBJECTS ON THE CIRCULATION FIELD  
OF THE PHASE-ENERGY SPECTRUM OF AN IMAGE**

An approach to object detection based on the analysis of the circulation of the vector field of the phase-energy spectrum of an image is proposed, which combines the advantages of the energy and phase-frequency spatial spectrum of a signal. Analytical expressions for the circulation of the phase-energy spectrum along a closed rectangular contour have been obtained.

В работе [1] был введен в рассмотрение фазоэнергетический спектр (ФЭС)  $\vec{I}(\varphi_x, \varphi_y) = \{I_x(\varphi_x, \varphi_y), I_y(\varphi_x, \varphi_y)\}$  - действительная функция, учитывающая свойства энергетического и фазочастотного пространственного спектра. ФЭС является векторным полем, аналитические выражения для координат которого получены в работе [2]:

$$\begin{cases} I_x(\varphi_x, \varphi_y) = \frac{1}{2} \sum_{p_x=-2M}^{2M} \sum_{p_y=-2N}^{2N} i_x(p_x, p_y) \cos(p_x \varphi_x + p_y \varphi_y), \\ I_y(\varphi_x, \varphi_y) = \frac{1}{2} \sum_{p_x=-2M}^{2M} \sum_{p_y=-2N}^{2N} i_y(p_x, p_y) \cos(p_x \varphi_x + p_y \varphi_y), \end{cases}$$

Циркуляция по замкнутому контуру прямоугольной формы

$$C = \sum_{p_x=-2M}^{2M} \sum_{p_y=-2N}^{2N} (p_y i_x(p_x, p_y) - p_x i_y(p_x, p_y)) (\varphi_{x2} - \varphi_{x1}) (\varphi_{y2} - \varphi_{y1}) \cdot \\ \cdot \text{sinc}\left(p_x \frac{\varphi_{x2} - \varphi_{x1}}{2}\right) \text{sinc}\left(p_y \frac{\varphi_{y2} - \varphi_{y1}}{2}\right) \sin\left(p_x \frac{\varphi_{x2} + \varphi_{x1}}{2} + p_y \frac{\varphi_{y2} + \varphi_{y1}}{2}\right).$$

где  $\varphi_{x1}, \varphi_{x2}, \varphi_{y1}, \varphi_{y2}$  – границы контура интегрирования.

Изображение содержит два объекта: один из них – *объект интереса* – статичен, а второй – «перемещающийся» по изображению *сканер* – согласованный по значению яркости объекта прямоугольной формы с задаваемой апертурой. Для каждого положения сканера на обрабатываемом изображении вычисляются в положительном направлении обхода циркуляция по контуру, представляющему собой границы первого частотного квадранта векторного поля фазоэнергетического спектра, тем самым формируется новое информационное поле. Анализ экстремального состава полученной таким образом функции двух переменных (координаты геометрического центра сканера) позволяет установить положение объектов на поле кадра.

Выбор размеров сканера зависит от размеров объекта. Сканер размерами  $1 \times 1$  точно передает границы объекта интереса, но его использование сопряжено со значительными вычислительными затратами (режим точной локализации). Использование сканера с размерами, превышающими локализуемый объект, приводит к значительному расширению обозначенной области и потере *точечного* экстремума (рис. 1). Такой выбор оправдан, если анализ изображения проводится с целью получить информацию о приблизительном количестве объектов при относительно «грубых» оценках их местоположения («сигнальный режим»).

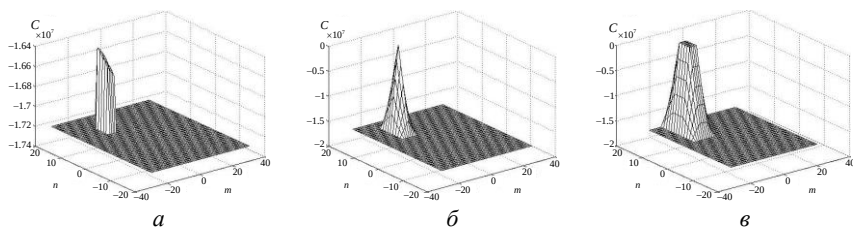


Рис. 1. Влияние размеров сканера на циркуляцию ФЭС при локализации объекта размерами  $5 \times 5$ : а)  $1 \times 1$ ; б)  $5 \times 5$ ; в)  $9 \times 9$

#### Список литературы

1. Богословский А.В., Жигулина И.В., Сухарев В.А. Векторное поле фазоэнергетического спектра изображения и видеопоследовательности // Радиотехника. 2018. № 11. С. 11-16.
2. Богословский А.В., Сухарев В.А., Жигулина И.В., Пантюхин М.А. Векторные поля, порождаемые преобразованием Фурье видеосигналов изображений // Радиотехника. 2021. № 7. С. 127-139.

С.К. КРУГЛОВ, А.В. ЛУПИН

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

## **ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА С РАСШИРЕННЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ ДИАПАЗОНОМ**

Предложены новые аппаратные и программные инструментальные средства с расширенным динамическим диапазоном для оптико-электронной измерительной системы высокотемпературного dilatометра. Приведён общий подход к разработке измерительных систем с расширенным динамическим диапазоном на базе «систем на кристалле». Рассмотрена методика измерения удлинения образца.

S.K. KRUGLOV, A.V. LUPIN

*Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University*

## **OPTOELECTRONIC MEASURING SYSTEM WITH EXTENDED DYNAMIC RANGE**

New hardware and software tools with an extended dynamic range for the optoelectronic measuring system of a high-temperature dilatometer have been proposed. A general approach to the development of measurement systems with an extended dynamic range on SoC-based systems is given. The technique of measuring the elongation of the sample is considered.

Одним из новых способов измерения теплового расширения твёрдых образцов является предложенная в [1] оптико-электронная измерительная система высокотемпературного dilatометра.

Методика измерений включает в себя первоначальную калибровку системы и итеративную процедуру измерения удлинения образца.

Процедура измерения удлинения образца состоит из регистрации изображений образца, их обработки и расчёта удлинения. Изображения регистрируются после стабилизации температуры образца. В процессе измерительного эксперимента вся видео информация регистрируется на внешний жёсткий диск и может быть дополнительно обработана на следующих этапах.

В докладе рассматриваются аппаратные и программные инструментальные средства для исследования видеофайлов. Анализ видео информации производится с помощью специально разработанного программного обеспечения.

Для расширения динамического диапазона системы использовалась плата с функцией «система на кристалле» (SoC) – EBAZ4205. Плата выполнена на базе ПЛИС XC7Z010CLG400 [2], которая содержит двухъядерную вычислительную подсистему на базе ARM CortexA9, программируемую логику и блоки ввода/вывода. В состав платы входит: внешняя память DDR3 256MB, FLASH память – 128MB SLC NAND FLASH, Ethernet трансивер для сети 10/100 Mbps.

Разработана методика и создано программное обеспечение для ввода изображения с видеокамер в память модуля, и проведения его анализа. На рис. 1 показаны реальные изображения, полученные на оптико-электронной измерительной системе при температуре 3000 К.

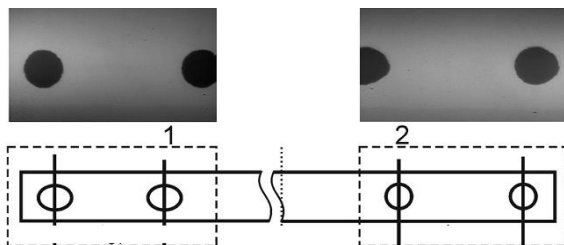


Рис. 1. Схема соответствия исследуемого образца и изображений с видеокамер

Задача управления и обработки изображений была разделена на два этапа. На первом этапе выполняется ввод изображения с видеокамер, управление их параметрами [3] (коэффициент усиления, время накопления, калибровка и так далее). Схема создана на языке SystemVerilog, программы для микропроцессора ARM CortexA9 – на языке Си. Это позволило расширить динамический диапазон измерительной системы в реальном времени. На втором этапе исследования проводятся на компьютере, для чего разработана библиотека программ для анализа изображения.

#### Список литературы

1. Бронштейн И.Г., Иночкин Ф.М., Круглов С.К. и др. Оптико-электронная измерительная система высокотемпературного дилатометра // Измерительная техника. 2015. № 12. С. 38-42.
2. Zynq-7000 SoC Data Sheet: Overview DS190 (v1.11.1) July 2, 2018 P.
3. Круглов С.К., Лупин А.В. Динамическое управление режимами работы матричной камеры на основе «системы на кристалле» // XIII международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2024. С. 583-584.

С.А. РОГОВ, И.В. ВЛАСОВА

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

## **ДИНАМИЧЕСКИЙ ДИАПАЗОН МНОГОКАНАЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ**

Рассмотрено влияние числа каналов на динамический диапазон многоканальных оптических систем обработки одномерных сигналов с двумерным преобразованием Фурье, таких, как система обработки сигналов антенной решётки и анализатор спектра длинных сигналов с растровым вводом.

S.A. ROGOV, I.V. VLASOVA

*The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications*

## **DYNAMIC RANGE OF MULTI-CHANNEL FOURIER SIGNAL PROCESSORS**

The influence of the number of channels on the dynamic range of multichannel optical systems for processing one-dimensional signals with two-dimensional Fourier transform, such as an antenna array signal processing system and a spectrum analyzer for long signals with raster input, is considered.

Динамический диапазон (ДД) в системах оптической обработки сигналов обычно измеряется по нескольким гармоническим сигналам одинаковой амплитуды, подаваемых на вход устройства. Его величина зависит от уровня шумов и сигналов на выходе, в том числе и ложных выходных сигналов, связанных с сигналами кратных и комбинационных частот, появляющимися на входе из-за нелинейности характеристики пространственного модулятора света (ПМС) [1].

В работе [2] было показано, что в одноканальном анализаторе спектра с пространственным интегрированием при увеличении ширины входного пространственного сигнала в  $N$  раз, ДД увеличивается по ложным сигналам второго порядка в  $\sqrt{N}$  раз, а по ложным сигналам третьего порядка в  $\sqrt[3]{N^2}$  раз. Таким же может быть увеличение ДД и в многоканальных фурье-процессорах при увеличении числа каналов в  $N$  раз, если в этих системах сигналы и шум на выходе изменяются также, как в одноканальном устройстве, а именно: интенсивность выходных (в

том числе и ложных) сигналов растет пропорционально  $N^2$ , а интенсивность шума – пропорционально  $N$ .

При измерении ДД в оптической системе обработки сигналов линейной антенной решётки (АР) [3] в каналы многоканального ПМС должны подаваться входные гармонические сигналы с линейным сдвигом фаз от канала к каналу. Оптические сигналы в выходной плоскости фурье-процессора представляют при этом световые максимумы, интенсивность которых пропорциональна величине:  $I_{\max} \sim (bXNW)^2$ , где  $X$  – высота каналов,  $W$  – их ширина,  $N$  – число каналов,  $b$  – амплитуда сигнала в каналах ПМС. Нетрудно показать, что в ложных сигналах начальные фазы входных сигналов будут складываться в такой же комбинации, как и частоты. Поскольку начальные фазы входных сигналов в ПМС имеют линейный сдвиг фаз от канала к каналу, то и их комбинации также будут иметь линейный сдвиг фаз. В результате ложные гармоники, появляющиеся на входе устройства, будут обрабатываться также, как и входные сигналы, а интенсивность их максимумов на выходе будет определяться приведённым выше выражением, если амплитуду входного сигнала  $b$  заменить на амплитуду соответствующего ложного сигнала.

Выражение для средней интенсивности оптического шума на выходе многоканального фурье-процессора, которое можно получить по методике, изложенной в работе [4], будет иметь следующий вид:  $\bar{I}_n(\xi, \eta): XNWW_n(\xi, \eta)$ , где  $W_n(\xi, \eta)$  – спектр пространственных частот корреляционной функции случайного процесса на входе оптической системы.

Полученные выражения для интенсивностей выходных сигналов и шума совпадают с соответствующими формулами для одноканального анализатора спектра с шириной входного пространственного сигнала  $NW$ , поэтому увеличение ДД системы обработки сигналов АР будет таким же, как и у одноканального фурье-процессора с расширенной в  $N$  раз апертурой.

Аналогичный вывод можно сделать и для многоканального оптического анализатора спектра длинных сигналов с растровым вводом, сигналы в каналах ПМС которого также имеют линейный фазовый сдвиг.

#### Список литературы

1. Дюбов А.С., Кузьмин М.С., Рогов С.А. // Оптический журнал. 2023. Т. 90 (2). С. 78-88.
2. Рогов С.А., Ходукин П.А. // ПКМ-2025. Сборник докладов конф. СПб: СПбГУТ, 2026.
3. Ламберт Л., Арм М., Аймет А. // Зарубежная радиоэлектроника. 1968. № 8. С. 3-34.
4. Кондратенков Г.С. Обработка информации когерентными оптическими системами. М.: Сов.радио, 1972.



В.М. КОТОВ, С.В. АВЕРИН, А.Н. БУЛЮК, М.В. КАРАЧЕВЦЕВА  
*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН*

## **УПРАВЛЯЕМЫЙ ПОВОРОТ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОФОНОННОЙ БРЭГГОВСКОЙ ДИФРАКЦИИ**

Предложен метод управляемого поворота плоскости поляризации линейно-поляризованного излучения с использованием двух- и трёхфононной брэгговской дифракции, а также дифракции в промежуточном режиме. Метод основан на сложении двух взаимно ортогональных эллиптически поляризованных волн, фазы которых управляются звуковой волной. Ячейка, изготовленная из кристалла парателлурита ( $\text{TeO}_2$ ), позволила менять угол поворота поляризации линейно поляризованного излучения с длиной волны 0.63 мкм от 0 до  $\sim 280^\circ$  при изменении частоты звука от 25 до 50 МГц.

V.M. KOTOV, S.V. AVERIN, A.N. BULYUK,  
M.V. KARACHEVTSEVA

*Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS*

## **CONTROLLED ROTATION OF THE POLARIZATION PLANE USING MULTIPHONON BRAGG DIFFRACTION**

A method of controlled rotation of the plane of polarization of linearly polarized radiation using two- and three-phonon Bragg diffraction, as well as diffraction in the intermediate regime, is proposed. The method is based on the addition of two mutually orthogonal elliptically polarized waves, the phases of which are controlled by a sound wave. A cell made of paratellurite crystal ( $\text{TeO}_2$ ) allowed changing the angle of rotation of the polarization of linearly polarized radiation, with a wavelength of 0.63 mkm from 0 to  $\sim 280^\circ$  when the sound frequency changes from 25 to 50 MHz.

Предложен метод и разработано акустооптическое (АО) устройство, управляемое частотой электрического сигнала, позволяющее управлять поворотом поляризации линейно поляризованного излучения в широких пределах. Метод основан на сложении двух взаимно ортогональных волн, распространяющихся в гиротропном кристалле, амплитуды и фазы которых контролируются частотой звуковой волны.

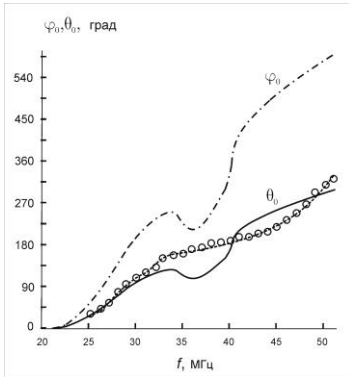


Рис. 1. Зависимость угла  $\theta_0$  поворота от частоты звука  $f$

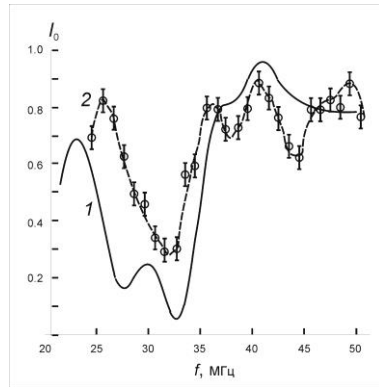


Рис. 2. Зависимость интенсивности  $I_0$  от частоты звука  $f$

На рис. 1 и 2 приведены теоретические и экспериментальные зависимости угла поворота  $\theta_0$  плоскости поляризации и интенсивности  $I_0$  нулевого брэгговского порядка от частоты звука  $f$  в процессе АО-взаимодействия в промежуточном режиме дифракции в кристалле  $\text{TeO}_2$ . На рис. 1  $\varphi_0$  – сдвиг фазы одной из собственных волн кристалла. Длина волны оптического излучения – 0.63 мкм. Дифракция происходит на «медленной» звуковой волне, распространяющейся в  $\text{TeO}_2$  со скоростью 617 м/с. Такая геометрия АО-дифракции наиболее часто встречается на практике, когда используется кристалл  $\text{TeO}_2$  в качестве АО-среды. Видно, что существует хорошее согласие между теоретическими и экспериментальными результатами. Отметим, что  $\theta_0$  меняется на  $\sim 280^\circ$  при изменении частоты звука от 25 до 50 МГц, при этом интенсивность нулевого брэгговского порядка не опускается ниже 30 %.

Работа выполнена в рамках Госзадания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

**С.В. БОРИТКО**

*Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва*

## **ПОВЫШЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО РАЗРЕШЕНИЯ АКУСТООПТИЧЕСКОГО МОНОХРОМАТОРА**

В работе обоснована возможность непосредственного повышения спектрального разрешения акустооптического монохроматора за счёт регистрации второй производной оптического излучения. Данный факт был экспериментально подтверждён на макете монохроматора, созданного на основе квазиколлинеарной акустооптической ячейки, использующей резкое периодическое переключение фазы управляющего сигнала на 180 град. При этом спектральное разрешение увеличилось в три раза.

**S.V. BORITKO**

*Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow*

## **INCREASING THE SPECTRAL RESOLUTION OF AN ACOUSTO-OPTICAL MONOCHROMATOR**

The paper substantiates the possibility of direct increasing of an acousto-optic monochromator spectral resolution by registration of the optical radiation second derivative. This was confirmed experimentally using a monochromator prototype based on a quasi-collinear acousto-optic cell with a sharp periodic 180-degree switching of the control signal phase. This ensured a 3-fold increase in spectral resolution.

Перед спектрометрией многокомпонентных субстанций стоят две основные задачи: точное определение частоты спектральных составляющих в перекрывающихся спектрах отдельных компонент и насколько близко расположенные спектральные составляющие можно достоверно различать. Решение второй задачи всецело определяется шириной аппаратной функции используемого монохроматора. Если спектральные компоненты исследуемого сигнала попадают внутрь аппаратной функции, то они не различимы. Следовательно, встает вопрос возможности уменьшения ширины аппаратной функции и, тем самым, повышения спектрального разрешения.

В НТЦ Уникального приборостроения РАН на базе квазиколлинеарной акустооптической ячейки был разработан макет спектрометра, регистрирующего производные оптического сигнала [1, 2]. В основе его работы лежит дифракция оптического сигнала на акустической волне с

резким периодическом переключении фазы [3, 4]. В целях исследования возможности повышения спектрального разрешения акустооптического монохроматора за счёт регистрации второй производной оптического излучения была проведена модификация электронной части и создан соответствующий макет.

На рис. 1 слева приведена принципиальная схема созданного макета; справа представлена одна из спектральных линий излучения неоновой лампы, зарегистрированная макетом (которая, по сути, является эквивалентом аппаратной функции) в случае отсутствия (пунктир) или присутствия (сплошная линия) переключения фазы. Чётко видно уменьшение ширины зарегистрированных сигналов, что говорит о повышении спектрального разрешения. Ширина аппаратной функции по уровню 0,7 при отсутствии периодического переключения фазы составило 0,075 нм, а в случае переключения фазы на 180 град. – 0,025 нм. Таким образом, можно утверждать, что выигрыш в спектральном разрешении доходит до трёх раз.

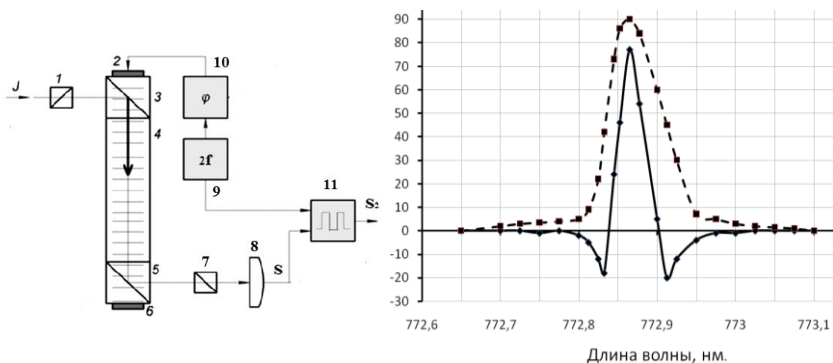


Рис. 1. Принципиальная схема созданного макета и эквивалент его аппаратной функции: 1 – поляризатор; 2 – пьезопреобразователь; 3, 5 – светоделительные призмы, имеющие отрагательную плоскость; 4 – кристалл парателлурита,  $\text{TeO}_2$ ; 6 – звукопоглотитель; 7 – анализатор; 8 – фотоприёмник; 9 – синтезатор частоты; 10 – высокочастотный фазовращатель; 11 – синхронный детектор

#### Список литературы

1. Боритко С.В., Карандин А.В. // Сборник научных трудов VII Международной конференции по фотонике и информационной оптике. М.: НИЯУ МИФИ, 2019. С. 41-42.
2. Боритко С.В., Иванов С.И., Карандин А.В. // Журнал радиоэлектроники. 2021. № 11.
3. Пустовойт В.И., Пожар В.Э. // Радиотехника и электроника. 1998. Т. 43 (1). С. 121-127.
4. Пожар В.Э., Пустовойт В.И. // Успехи современной радиоэлектроники. 2006. Вып. 9. С. 47-61.

**В.А. БУЛГАКОВ, В.И. ТЕЛЕШЕВСКИЙ**

*Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»*

## **ПРЕИМУЩЕСТВА ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ФАЗОВОГО СДВИГА В ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ**

В работе рассмотрены недостатки интерференционного контроля и преимущества применения фазового сдвига в интерферометрическом контроле. Более детально представлено сравнение двух методов контроля. Также обсуждаются ряд проблемных вопросов в данной области.

**V.A. BULGAKOV, V.I. TELESHEVSKY**

*Moscow State University of Technology «STANKIN»*

## **ADVANTAGES OF USING THE PHASE SHIFT METHOD IN INTERFEROMETRIC CONTROL**

The paper discusses the disadvantages of interference control and the advantages of using phase shift in interferometric control. A detailed comparison of the two control methods is presented. The paper also discusses a number of problematic issues in this field.

Интерферометрический контроль отклонений формы изделий является чрезвычайно мощным методом, однако, у него есть несколько недостатков. Определение местоположения центров интерференционных полос, что в конечном итоге ограничивает точность метода, является сложной задачей, а любые изменения интенсивности по интерферограмме или изменения чувствительности фотодетектора приводят к появлению ложных ошибок. Ещё одним недостатком является то, что данные генерируются только вдоль центров интерференционных полос, а не на равномерно распределённой сетке, которая требуется для многих процедур анализа. Наконец, поскольку несколько широко расставленных интерференционных полос можно измерить более точно, чем много близко расположенных, существует компромисс между разрешением и количеством точек данных [1].

Фазово-сдвиговая интерферометрия преодолевает эти ограничения. Она представляет собой высокоэффективный и точный метод измерения фазы, особенно при замере двумерных фазовых распределений, например, в оптических испытаниях, микроскопии с дифференциальным интерференционным контрастом и профилировании поверхностей с

помощью проекции интерференционных полос, в основном, благодаря высокой скорости и точности измерения фазы [2]. В табл. 1 представлено составленное авторами сравнение двух методов интерферометрического контроля.

Таблица 1. Сравнение методов интерферометрического контроля

| Критерий                      | Метод фазового сдвига                                      | Классическая интерферометрия                           | Преимущество фазового сдвига                                                    |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Точность измерения фазы       | До $\lambda/100$ (и выше)                                  | $\sim \lambda/20$                                      | Пятикратное и более увеличение точности                                         |
| Чувствительность к вибрациям  | Низкая (при использовании высокоскоростных камер)          | Очень высокая                                          | Позволяет измерять в условиях, где классический метод неэффективен              |
| Воспроизводимость результатов | $\sim 0.1 \%$                                              | $\sim 1 - 5 \%$                                        | В 10 - 50 раз выше воспроизводимость                                            |
| Время измерения               | Единицы миллисекунд (для однокадровых систем)              | Единицы секунд (для анализа статичной картины)         | В 100 раз и более высокая скорость измерения                                    |
| Разрешение                    | Высокое, предоставляет точечные данные по всей поверхности | Низкое, разрешение зависит от ширины и контраста полос | Предоставляет полноценную карту высот, а не только информацию о положении полос |

Однако, несмотря на данные преимущества, ряд вопросов в этой предметной плоскости нуждается в более детальном изучении. Например, нерешённой остается проблема стабилизации метода фазового сдвига с помощью «аппаратного» подхода. В отдельной проработке нуждаются задачи повышения точности и надежности метода, направленные на уменьшение фазовых ошибок, вносимых фазовращателем (неточная калибровка, нелинейный отклик и температурная зависимость).

#### Список литературы

1. Ромашко Р.В. Особенности применения адаптивных интерферометрических волоконно-оптических датчиков акустической эмиссии для контроля состояния полимерных композиционных материалов // Дефектоскопия. 2024. № 1. С. 21-27.
2. Lu Q., Wang J. Adaptive light intensity aided wavelength tuning for phase-shifting interferometric measurement system // Microwave and Optical Technology Letters. 2024. V. 66. No. 6. P. 23-29.

А.С. БОРЕЙШО, А.В. САВИН

*Балтийский государственный технический университет «Военмех»  
им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург*

## **ВЛИЯНИЕ НЕИДЕАЛЬНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА РАБОТУ СУБДИФРАКЦИОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ УГЛОВЫХ ОТКЛОНЕНИЙ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА**

Исследуется зависимость погрешностей субдифракционного метода измерения угловых отклонений юстировочного лазерного пучка [1] от сферичности оптических элементов. Показано, что сферичность вплоть до одной полосы (на рабочей длине волны) не оказывает существенного влияния на метрологические характеристики метода.

A.S. BOREYSHO, A.V. SAVIN

*Baltic State Technical University «Voenmeh» named after D.F. Ustinov, Saint-Petersburg*

## **INFLUENCE OF NON-IDEAL OPTICAL ELEMENTS ON THE OPERATION OF A SUB-DIFFRACTIVE LASER BEAM ANGULAR DEVIATION METER**

The dependence of the errors of the subdiffraction method for measuring angular deviations of an alignment laser beam [1] on the sphericity of the optical elements is investigated. It is shown that sphericity of up to one fringe (at the operating wavelength) does not significantly affect the metrological characteristics of the method.

Задача измерения углового положения лазерных пучков относительно базовых оптических поверхностей возникает, например, когда соответствующий пучок используется как носитель системы отсчёта для юстировки сложных распределённых оптических систем. В [1] предложен оптоинформационный метод измерения отклонения лазерного пучка от нормали к базовой поверхности с погрешностью порядка 0.01..0.001 от дифракционного предела. Возникает вопрос: каковы требования к элементам оптической системы, и не исчезают ли преимущества предлагаемого метода, если неидеальность формы оптических элементов имеет тот же порядок, что и измеряемая величина, или тем более превышает её. Действительно, производство номинально плоской отражающей поверхности со сферичностью порядка  $\lambda/10$  уже представляет известную технологическую проблему.

Модель интерференционной картины, используемая для анализа, включает члены со сферичностью:

$$\frac{I(x,y)}{I_0} = \left\{ 1 + K \cos \left[ 2\pi \left( \frac{2\alpha}{\lambda} (x - x_0) + \frac{2\beta}{\lambda} (y - y_0) + N \left( \frac{r}{d} \right)^2 \right) + \varphi \right] \right\} \exp \left[ -8 \left( \frac{r}{d} \right)^2 \right],$$

где  $\alpha, \beta$  – углы отклонения пучка от нормали в двух плоскостях,  $d$  – диаметр пучка ( $1/e^2$ ),  $K$  – контраст изображения интерференционной картины;  $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$  – расстояние от центра пучка,  $N$  – число полос сферичности поверхности на диаметре пучка.

На рис. 1 показаны зависимости SNR и относительной ошибки измерения (по отношению к дифракционному пределу  $\lambda/(2d)$  от самого относительного угла отклонения пучка для идеального интерферометра (рис. 1а) и для суммарной сферичности с числом полос  $N = 1$  (рис. 1б). Результаты вычислений показывают, что даже при такой большой сферичности диапазон углов, в котором SNR превышает единицу ( $\sim 0.03..10$ ) уменьшается несущественно.

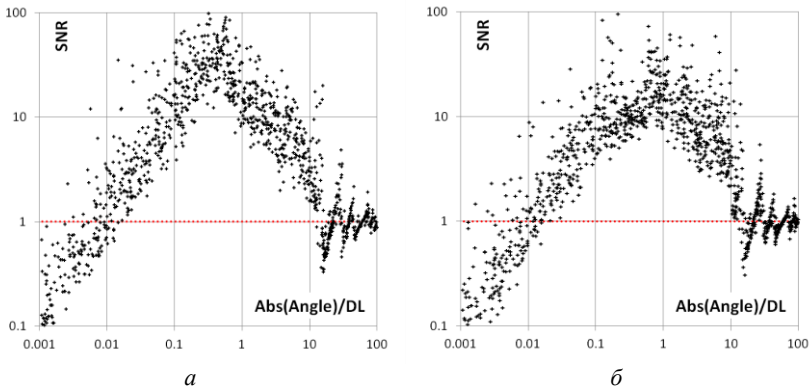


Рис. 1. Зависимость SNR от относительного угла: SNR = 3;  $K = 0.5$ ;  $64 \times 64$  pix;  $d/D = 1$ ;  $d = 1.6$  мм;  $\lambda = 0.63$  мкм;  $DL = 0.21$  мрад.  $N = 0$  (а),  $N = 1$  (б)

#### Список литературы

1. Борейшо А.С., Савин А.В., Страхов С.Ю., Ершов А.Г., Суханов Г.А., Джамгадзе Г.Т., Сотникова Н.В. Оптоинформационный метод субдифракционных угловых измерений // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 12. С. 13-23.



К.А. ЦЕЛОГОРОДЦЕВ<sup>1,2</sup>, И.О. АНТОНОВ<sup>1,2</sup>, С.П. КОТОВА<sup>1,2</sup>,  
Н.Н. ЛОСЕВСКИЙ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

<sup>2</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королёва

## **СВЕТОВЫЕ ПОЛЯ С МЕДЛЕННОВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕВИТИРУЕМЫМИ МИКРООБЪЕКТАМИ**

В работе рассмотрен способ использования световых полей для управления вращением микро- и наночастиц. Для регулирования скорости вращения предлагается применять линейно-поляризованные световые поля с медленной ротацией плоскости поляризации. Предложен метод для поворота плоскости поляризации в килогерцовом диапазоне частот. Создана оптическая схема для захвата левитируемых микрообъектов и их дальнейшего вращения. Экспериментально определены частота вращения вектора поляризации 9.8 Гц и оптимальная мощность лазерного излучения 21 мВт.

K.A. TSELOGORODTSEV<sup>1,2</sup>, I.O. ANTONOV<sup>1,2</sup>, S.P. KOTOVA<sup>1,2</sup>,  
N.N. LOSEVSKY<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara Branch of Lebedev Physical Institute of the RAS

<sup>2</sup>Samara National Research University

## **SLOWLY ROTATING POLARIZED LIGHT FIELDS FOR CONTROLLING LEVITATED MICRO-OBJECTS**

The paper considers a method of using light fields to control the rotation of micro- and nanoparticles. It is proposed to use linearly polarized light fields with slow rotation of the polarization plane to control the rotation speed. A method is proposed for rotating the plane of polarization in the kilohertz frequency range. An optical circuit has been created for capturing levitated microobjects and their further rotation. The rotation frequency of the polarization vector of 9.8 Hz and the optimal laser radiation power of 21 mW have been experimentally determined.

В настоящее время активно развиваются технологии создания сверхчувствительных сенсоров, в том числе наногироскопов [1] на основе левитируемых микро- и наночастиц [2]. Сверхчувствительные сенсоры на основе левитируемых вращающихся микрочастиц в гармоническом потенциале могут использоваться для исследования химического состава различных материалов с помощью силовой ЯМР-спектроскопии [3]. Для

придания вращения левитируемым частицам используются световые поля с круговой поляризацией [4], при этом максимальная скорость вращения частицы ограничивается вязким трением в газовой среде либо её механическим разрушением под действием центробежных сил.

В данной работе было предложено использовать световые поля с медленно вращающейся линейной поляризацией для контролируемого вращения левитируемых частиц. Для реализации на эксперименте выбран подход, заключающийся в пропускании циркулярно-поляризованного света через вращающийся поляризатор. Частота вращения поляризатора определяет скорость вращения плоскости поляризации входящего света.

$$\text{Re}(\vec{E}) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \cos(k_s z - \omega_s t) \\ \sin(k_s z - \omega_s t) \end{bmatrix} \cos(k_{1,2} z - \omega_{1,2} t). \quad (1)$$

Предложенный подход может быть описан выражением (1) с помощью формализма матриц Джонса для света с круговой поляризацией. Из данного выражения видно, что из поляризатора выходит свет с медленно вращающейся поляризацией и несущей частотой  $\omega_{1,2} = \omega \pm \omega_s$  в зависимости от того, вращаются поляризатор и изначальная волна с круговой поляризацией в разные стороны или в одну.

Для осуществления манипуляции частицами была создана экспериментальная установка на основе оптического левитатора. Главными элементами являются: плоско поляризованный DPSS лазер; четвертьволновая пластинка, сделанная из слюдяных пластин; вращающийся поляризатор и микроскоп. Для стабильного захвата микрочастиц на выходе из микроскопа устанавливалось сферическое зеркало таким образом, чтобы фокусное расстояние зеркала и микроскопа совпадали. Это позволяло скомпенсировать возникающую фотофоретическую силу.

В результате экспериментов было определено оптимальное значение мощности лазерного излучения, при котором осуществлялся стабильный оптический захват – 21 мВт. Для будущих экспериментов по контролируемому вращению частиц была собрана и охарактеризована система управления поляризацией. В оптической схеме при помощи фотодиода и осциллографа была экспериментально измерена частота вращения вектора поляризации – 9,8 Гц.

#### *Список литературы*

1. Zeng K., Xu X., Wu Y., et al. // Microsystems & Nanoeengineering. 2024. V. 10 (1). P. 78.
2. Laan F.v.d., Reimann R., Militaru A., et al. // Phys. Rev. A. 2020. V. 102. P. 013505.
3. Won S., Saun S.B., Lee S., et al. // Sci Rep. 2013. V. 3. P. 3189.
4. Ahn J., Xu Z., Bang J., et al. // Phys. Rev. Lett. 2018. V. 121. P. 033603.

Н.В. НИКИТИН<sup>1,2</sup>, Д.Р. ХАРАСОВ<sup>2</sup>, С.О. ГОСТИЛОВИЧ<sup>2</sup>,  
Д.М. БЕНГАЛЬСКИЙ<sup>2</sup>, В.Н. ТРЕЩИКОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

<sup>2</sup>Группа компаний Т8, Москва

## **АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ОБЪЕДИНЕНИЯ ДАННЫХ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ РЭЛЕЕВСКИХ И РАМАНОВСКИХ РЕФЛЕКТОМЕТРОВ**

В работе проведено сравнение полносвязной, рекуррентной, свёрточной нейросети для объединения показаний температуры с рамановского и рэлеевского фазового рефлектометров.

N.V. NIKITIN<sup>1,2</sup>, D.R. KHARASOV<sup>2</sup>, S.O. GOSTILOVICH<sup>2</sup>,  
D.M. BENGALSKI<sup>2</sup> V.N. TRESHCHIKOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

<sup>2</sup>Group of companies «T8», Moscow

## **ANALYSIS OF THE APPLICATION OF VARIOUS TYPES OF NEURAL NETWORKS FOR THE INTEGRATION OF DATA FROM DISTRIBUTED TEMPERATURE SENSORS BASED ON RAYLEIGH AND RAMAN REFLECTOMETERS**

The study compared a fully connected, recurrent, and convolutional neural network for integrating temperature readings from Raman and Rayleigh phase sensitive reflectometers.

Распределённые температурные системы (DTS) находят всё более широкое применение в таких сферах, как геофизический мониторинг и системы пожарной сигнализации [1]. Для определения абсолютного значения температуры используются системы, основанные на эффекте комбинационного рассеяния (R-DTS). В свою очередь, системы на основе рэлеевского рассеяния (DTGS) применяются для измерений изменений температуры, точность измерений в пределах 0.01°C/c [2]. Однако DTGS предоставляет лишь относительные температурные данные. Совместное использование данных с обоих типов систем (eDTS) с их обработкой позволяет повысить точность измерений абсолютной температуры [3].

В работе проведено экспериментальное сравнение полносвязной (MLP), рекуррентной (RNN), свёрточной (CNN) нейросети для реализации системы eDTS. Обучение нейронных сети сводилось к минимизации отклонений предсказываемой температуры относительно опорного датчика. В качестве опорного измерения использовался датчик PT1000, подключенный к высокоточному мультиметру Keithley DMM6500 (рис. 1).

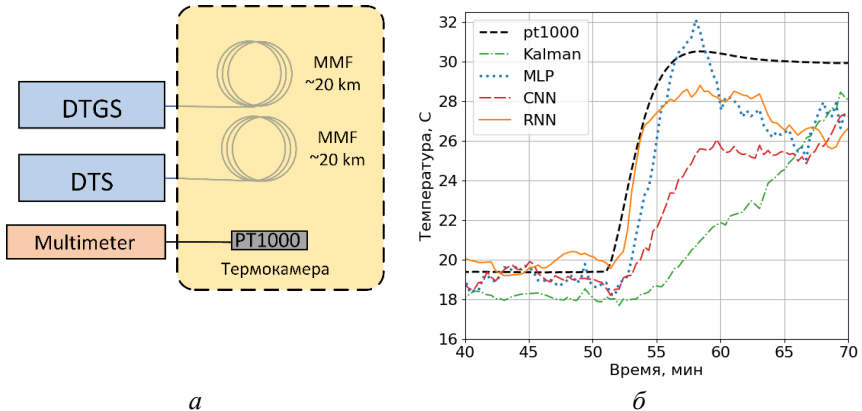


Рис. 1. Схема эксперимента (а), результаты для линии 20 км для одного пространственного канала (б)

Для сравнения алгоритмов использована метрика, характеризующая временную задержку системы при изменении температуры. Быстродействие системы – интервал времени, необходимый для пересечения границы, соответствующей трём среднеквадратическим отклонениям (СКО) ( $3\sigma$ ) от среднего сигнала. Здесь  $\sigma$  – СКО, рассчитанное на стационарном (установившемся) участке сигнала.

Использование нейросетей для задачи объединения данных R-DTS и DTGS позволило получить повышение быстродействия системы на изменение температуры в 2 раза, уменьшить СКО на стационарных участках в 2 раза в сравнении с стандартными методами фильтрации. RNN имеет на 20 % лучшее быстродействие, в сравнении с другими типами нейронных сетей.

#### Список литературы

1. Vartapetov S.K., Ganin D.V., et al. // Quantum Electronics. 2015. V. 45 (8). P. 725.
2. Ganin D.V., Obidin A.Z., et al. // Physics Procedia. 2015. V. 73. P. 67-73.
3. Couairon A., Sudrie L., et al. // Phys. Rev. B. 2005. V. 71. P. 125435.

К.А. ПЯТИБРАТОВ

*Сколковский институт науки и технологий*

## **РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ОПТИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ ХРАНЕНИЯ-НАКОПЛЕНИЯ**

Разработан алгоритм, позволяющий моделировать и оценивать результаты работы фотонной ячейки умножения-накопления. Использование разработанного ПИК позволит значительно сократить время умножения чисел, матриц и вычислений свёрток. Таким образом, работа важна для развития систем искусственного интеллекта, машинного обучения, криптографии и других областей науки и техники, где свёртка и умножение являются часто повторяющимися рабочими операциями. Наименьшее пиковое отношение сигнал/шум различается для различных плотностей квантования диапазона фазового сдвига. Аналогичный эффект достигается при изменении расходимости пучка. В частности, при  $\alpha$ , равном 1, погрешность достигает 86 % интервалов между возможными значениями, а при значениях  $\alpha \leq 0,05$  погрешность уменьшается на 1 - 2 порядка. Зависимость PSNR от альфа экспоненциальная, что подчёркивает важность использования плоскопараллельных излучателей с минимально возможной расходимостью.

К.А. PYATIBRATOV

*Skolkovo Institute of Science and Technology*

## **DEVELOPMENT AND STUDY OF THE PROPERTIES OF AN OPTICAL STORAGE-ACCUMULATION CELL**

An algorithm has been developed for simulating and evaluating the performance of a photonic multiply-accumulate cell. Using the developed PIC will significantly reduce the time required for multiplying numbers, matrices, and computer convolutions. This approach, therefore, is instrumental in advancing artificial intelligence, machine learning, cryptography, and other fields of science and technology where convolution and multiplication are frequently repeated. A lower peak signal-to-noise ratio is observed for different phase shift quantization densities. A similar effect is observed with a decrease in beam flow rate. In particular, for  $\alpha$  equal to 1, the error reaches 86 % of the range between possible values, while for  $\alpha \leq 0.05$ , the shift error is 1 - 2 orders of magnitude. The dependence of PSNR on alpha is an exponential function, which emphasizes the performance of plane-parallel emitters with the lowest possible divergence.

Быстро рассчитать свёртку матриц можно с помощью нового метода – ячейек умножения-накопления (Multiplication-Accumulation Cell,

MAC) Если представить матрицы как две пространственно модулированных световых плоских волны, то их интерференция будет содержать компоненты произведения. Результат умножения получается мгновенно для всех чисел в матрице – задача электронной схемы сводится только к преобразованию данных фотодетектора в числа. Сдвигая одну матрицу относительно другой, можно получить свёртку за десятки раз меньше операций, чем классические компьютерные методы. Модель луча:

$$I(x, y) = I_0 \cdot \frac{1}{1 + \alpha^2((x - x_0)^2 + (y - y_0)^2)}.$$

Для использования MAC необходимо зарегистрировать три интерференции: первый модулированный луч с плоской волной,  $I_1$ ; второй модулированный луч с плоской волной,  $I_2$ ; оба модулированных луча друг с другом,  $I_{dual}$  (рис. 1). Поскольку интенсивность определяется теоремой косинусов, можно записать:  $\varphi_1\varphi_2 \sim (I_{dual} - I_1 - I_2)/2A^2 + 1$ .

Погрешность в определении  $\varphi_1\varphi_2$  составляет – 30...40 dB. Этот результат может быть получен для матриц 4 x 4 с глубиной кодирования в 64 значения и представлен на рис. 2.

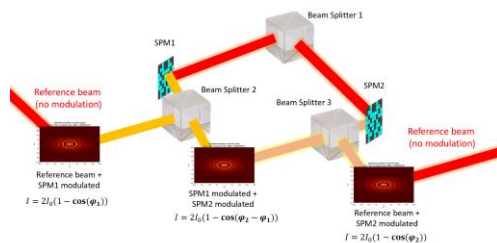


Рис. 1. Структурная схема MAC

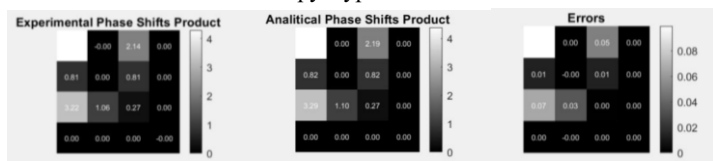


Рис. 2. Симуляция работы MAC для случая 4 x 4

#### Список литературы

1. Zhou H., Dong J., Cheng J., et al. Photonic matrix multiplication lights up photonic accelerator and beyond // Light Sci Appl. 2022. V. 11. P. 30.
2. Clements, et al. An Optimal design for universal multiport interferometers // <https://arxiv.org/pdf/1603.08788>.
3. Bar C., Gkioulekas I., Levin A. Efficient Monte Carlo simulation of spatiotemporal speckles and their correlations // Optica. 2023. V. 10. P. 1081-1092.

**А.А. КЕРОВ, А.В. КОЗЛОВ, П.А. ЧЕРЁМХИН, В.Г. РОДИН**

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **АНАЛИЗ МЕТРИК И МЕТОДОВ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ КАМЕР ПО ПОРТРЕТАМ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ШУМОВ**

Исследована эффективность идентификации цифровых камер по изображениям портретов пространственного светового шума фотосенсоров. Проанализировано влияние метрик сравнения изображений и методов выделения высокочастотной компоненты на точность идентификации.

**A.A. KEROV, A.V. KOZLOV, P.A. CHEREMKHIN, V.G. RODIN**

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

## **ANALYSIS OF METRICS AND FILTERING METHODS FOR CAMERA IDENTIFICATION USING SPATIAL NOISE PORTRAITS**

The study investigates the effectiveness of digital camera identification based on spatial light noise portraits of their photosensors. The analysis focuses on the impact of different image comparison metrics and high-frequency component extraction methods on identification accuracy.

Идентификация камер является ключевой задачей цифровой криминалистики, позволяя установить происхождение снимка по аналогии с баллистической экспертизой [1]. Уникальные «отпечатки» матрицы – структурный шум и дефекты пикселей – сохраняются при обработке и обеспечивают устойчивую связь изображения с конкретной камерой [2], подтверждая его подлинность и источник [3]. Идентификация камеры как источника снимков является признанным методом судебной экспертизы [4].

Целью данной работы являлось исследование возможности повышения точности идентификации камер путём определения оптимальной метрики сходства изображений и оптимизации параметров цифровых фильтров, применяемых для выделения высокочастотной компоненты анализируемых изображений, содержащей значительную часть пространственного шума фотосенсора.

В работе использовались изображения, полученные тремя цифровыми камерами: Retiga R6 (ПЗС, монохромная, 14 бит), Pixelink PL-B781F

(КМОП, монохромная, 10 бит) и Canon EOS M100 (КМОП, цветная, 13,5 бит). Для каждой камеры зарегистрированы серии световых и темновых кадров для извлечения шумового портрета, а также тестовые изображения для проверки методов идентификации.

В качестве метрик сходства применялись как корреляционные, так и структурные показатели: коэффициент корреляции (КК); модифицированное нормированное среднеквадратичное отклонение (НСКО'), равное разности 1 и НСКО; пиковая энергия корреляции (ПЭК); фазовая корреляция (ФК); структурное отношение краёв (СОК); индекс структурного сходства (ИСС). Для количественной оценки качества идентификации использовалось отношение средней величины подоби́я шумового портрета камеры с её снимками к подобным величинам для снимков, сделанных другими камерами (R, рис. 1). Получено, что метрика НСКО' обеспечила наилучшую оценку качества идентификации камер.

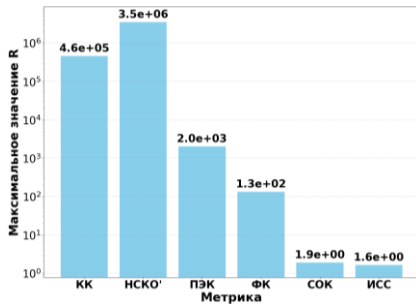


Рис. 1. Максимальные значения количественной метрики подоби́я для различных метрик качества

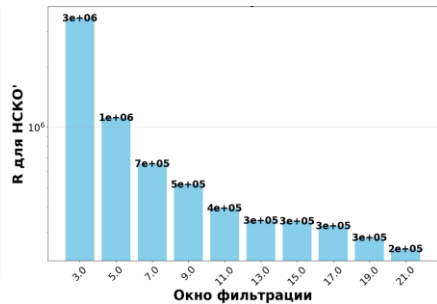


Рис. 2. Анализ чувствительности метрики НСКО' к параметрам фильтра Ли

Для повышения точности идентификации также проведено сравнение различных алгоритмов выделения высокочастотной компоненты изображений на основе фильтрации. Установлено, что фильтр Ли в зависимости от входящего параметра (рис. 2) обеспечил наивысшую точность идентификации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 24-19-00898.

#### Список литературы

1. Dirik A.E., Karaküçük A. // Optics Express. 2014. V. 22. P. 470-482.
2. Kozlov A.V., Nikitin N.V., Rodin V.G., Cheremkhin P.A. // Measurement Techniques. 2024. V. 66. P. 923-934.
3. Volkov A.A., Kozlov A.V., Cheremkhin P.A., et al. // Sensors. 2025. V. 25. P. 6088.
4. Bernacki J., Scherer R. // Sensors. 2025. V. 25. P. 3027.



О.И. ПОТАТУРКИН, С.И. ОРЛОВ, С.Б. УЗИЛОВ

*Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МУЛЬТИ- И ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПРИЗНАКОВ ПРИ КЛАССИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ РЕАЛЬНЫХ СЦЕН**

Предложены и программно реализованы методы обработки совокупности гиперспектральных изображений с целью формирования представительной системы признаков и последующего применения адаптивных алгоритмов обнаружения объектов интереса на основе поиска спектральных аномалий. Показана эффективность применения мульти- и гиперспектральных систем признаков для классификации объектов на изображениях реальных сцен.

O.I. POTATURKIN, S.I. ORLOV, S.B. UZILOV

*Institute of Automation and Electrometry of Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk*

## **INVESTIGATION OF EFFECTIVENESS OF MULTI- AND HYPERSPECTRAL FEATURE SYSTEMS IN REAL SCENE OBJECT CLASSIFICATION**

Methods for processing a set of hyperspectral images in order to form a representative system of features and subsequent use of adaptive algorithms for detecting objects of interest based on searching for spectral anomalies have been proposed and implemented in software. The effectiveness of using multi- and hyperspectral feature systems for classifying objects in images of real scenes is shown.

Развитие современных методов, алгоритмов и программных средств обработки последовательностей данных дистанционного зондирования Земли ориентировано на решение многочисленных научных и практических задач [1, 2]. При этом принципиально новые возможности возникают в случае использования гиперспектральных изображений, сформированных в результате видеосъемки на поверхности Земли [3 - 5].

Проведены экспериментальные исследования эффективности классификации природных и антропогенных объектов нескольких классов на реальном гиперспектральном изображении в 437 спектральных каналах видимого и ближнего ИК-диапазонов. Определена общая точность их классификации при использовании полной системы признаков, содержащей данные всех спектральных каналов ( $O_{Acc} = 99,7\%$ ). Такое количество признаков требует больших вычислительных затрат. Для их

сокращения использованы различные методы, в том числе главных компонент, последовательного добавления и сокращения каналов AdDel, объединения каналов в спектральных полосах фиксированной ширины.

Экспериментально показано, что сформированные методом главных компонент системы из трёх признаков позволяют решить задачу классификации с достаточно высокой точностью (94,07 %). Меньшее количество компонент для практических применений недостаточно, а большее избыточно, учитывая возрастающую сложность вычислений.

С помощью метода AdDel определены наиболее эффективные комбинации из двух и трёх каналов, обеспечившие точность классификации 79,76 и 92,76 %, соответственно. Дальнейший сплошной поиск в области найденных методом AdDel каналов позволил увеличить точность до 85,35 и 95,26 %, соответственно.

Объединение каналов в спектральных интервалах шириной 10 - 100 нм с шагом 10 нм обеспечило высокую точность классификации по трем признакам. Максимальная точность достигнута при ширине 20 нм (95,7 %) и практически не меняется до 70 нм. Применение аналога традиционного RGB менее эффективно, чем комбинации полос 400 - 499, 600 - 699 и 800 - 899 нм (81,6 % против 83,0 %).

Показано, что применение мультиспектральных систем признаков (интервалы 30 - 40 нм и более) вместо гиперспектральных позволяет существенно снизить время обработки данных и требования к техническим характеристикам оптико-электронной аппаратуры, сохранив при этом эффективность решения задач классификации природных и антропогенных объектов на изображениях реальных сцен.

#### *Список литературы*

1. Перспективные информационные технологии дистанционного зондирования Земли / под ред. В.А. Сойфера. Самара: Новая техника, 2015.
2. Бондур В.Г. Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и мультиспектральной аэрокосмической информации // Исследование Земли из космоса. 2014. № 1. С. 4-16.
3. Кузнецов А.Ю., Сергеев С.С. Анализ спектральных характеристик маскировочного покрытия с применением видеоспектрометра // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 2. С. 258-264.
4. Борзов С.М., Нежевенко Е.С., Орлов С.И., Потатуркин О.И., Узилов С.Б. Экспериментальные исследования эффективности классификации материалов по их спектрам отражения // Автометрия. 2024. Т. 60. № 5. С. 69-76.
5. Борзов С.М., Нежевенко Е.С., Орлов С.И., Потатуркин О.И., Узилов С.Б. Исследование гиперспектральных систем признаков для классификации природных и антропогенных объектов // Автометрия. 2025. Т. 61. № 4. С. 5-19.

Р.В. СКИДАНОВ, Л.Л. ДОСКОЛОВИЧ, Ю.В. ХАНЕНКО,  
А.С. ПРОНИН, А.Е. МОРОЗОВ, Д.М. СОРОКИН

*Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева*

## **ДИФРАКЦИОННАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ С ПРОГРАММНО- ЗАДАВАЕМОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ В 4F-СИСТЕМЕ**

Представлена оптическая установка в виде модифицированной 4F-системы для реализации дифракционной нейронной сети. Приведены результаты экспериментов по искусственному формированию нелинейного пропускания на пространственном модуляторе света в оптической установке, реализующей дифракционную нейронную сеть для задачи классификации рукописных цифр из базы данных MNIST.

R.V. SKIDANOV, L.L. DOSKOLOVICH, Yu.V. KHANENKO,  
A.S. PRONIN, A.E. MOROZOV, D.M. SOROKIN

*Samara National Research University*

## **DIFFRACTION NEURAL NETWORK WITH SOFTWARE- DEFINED NONLINEARITY IN A 4F SYSTEM**

An optical installation is presented in the form of a modified 4F system for implementing a diffraction neural network. The results of experiments on the artificial formation of nonlinear transmission on a spatial light modulator in an optical installation implementing a diffraction neural network for the task of classifying handwritten digits from the MNIST database are presented.

Дифракционная нейронная сеть это новое представление оптической обработки информации [1], где прохождение света через систему транспарантов рассматривается как обработка сигнала в многослойной нейронной сети. Настоящий взрывной всплеск количества публикаций на эту тему наступил в 2018 году после публикации в журнале Science [1]. Преобразование сигнала в такой сети идет согласно оптической теории дифракции Рэлея–Зоммерфельда. Однако все преобразования в рамках теории дифракции Рэлея–Зоммерфельда являются линейными, в то время как нелинейность нейронной сети является принципиальным свойством для решения многих задач. Конечно нелинейность может быть реализована и оптическими средствами за счёт использования нелинейных оптических материалов [2]. Однако такая нелинейность не очень удобна, как с точки зрения технической

реализации, так и с точки зрения неудобности самого вида нелинейности, поскольку нелинейность оптических материалов далека от оптимальной нелинейности для нейронной сети.

На рис. 1а приведена схема экспериментальной установки, в которой мы предлагаем за счёт электронного управления реализовывать нелинейный режим пропускания модулятора света.

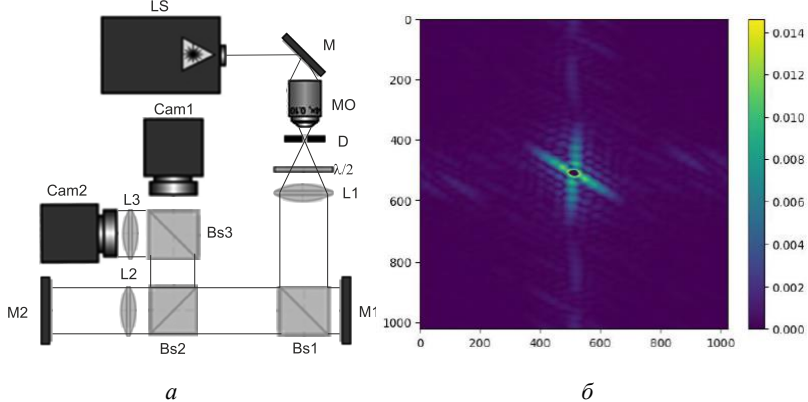


Рис. 1. Оптическая схема экспериментальной установки: LS – лазер (532 нм), M – поворотное зеркало, MO – микрообъектив (20×), D – диафрагма,  $\lambda/2$  – полуволновые пластины, L1 – линза коллиматор, Bs1, Bs2, Bs3 – делители пучка, M1 – входной модулятор, P – поляризатор, L2 – линзы, выполняющая преобразование Фурье, M2 – модулятор в частотной плоскости, L3 – линзы для формирования изображения распределения интенсивности в частотной плоскости, Cam1 – выходная камера, Cam2 – камера регистрирующая распределение интенсивности в частотной плоскости (а), пример реализованной нелинейной обработки (б)

В данном случае Cam2 регистрирует распределение интенсивности в частотной плоскости, и на основе распределения интенсивности меняется фазовая функция на модуляторе M2. Таким образом, можно реализовать с небольшой задержкой на обработку поступающего изображения, любую необходимую нелинейность. На рис. 1б приведён пример с нелинейностью в виде пороговой отсечки интенсивности в частотном спектре. Такую отсечку можно проводить и на полностью фазовом модуляторе, за счёт кодирования несущей частотой.

#### Список литературы

1. Lin X. et al. // Science. 2018. V. 361. No. 6406. P. 1004-1008.
2. Sun Y., et al. // Journal of the Optical Society of America B. 2023. V. 40. No. 11. P. 2951-2961.

А.П. ПОГОДА, В.В. СЕМЕНТИН, А.С. БОРЕЙШО  
*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»  
им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург*

## **ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ МИКРОМЕТРОВЫХ ЭТАЛОНОВ ПОСРЕДСТВОМ ЦИФРОВОЙ ДВУХДЛИННОВОЛНОВОЙ ГОЛОГРАФИИ**

Приведены результаты измерения и визуализации микрометровых эталонов глубиной 100 и 25 мкм с помощью двухдлинноволновой цифровой голографии. Две длины волны обеспечиваются перестройкой низкокогерентного лазерного диода в пределах 2 нм. На данный момент разработанная система работает в лабораторных условиях и не предназначена для использования в полевых условиях. На измерения могут повлиять вибрации, влияние ветра и изменения температуры.

A.P. POGODA, V.V. SEMENTIN, A.S. BOREYSHO  
*Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D.F. Ustinov, Saint Petersburg*

## **VISUALIZATION OF THE SURFACE PROFILE OF MICROMETER STANDARDS USING DIGITAL DUAL-WAVELENGTH HOLOGRAPHY**

The results of measuring and visualizing micrometer standards with depths of 100 and 25  $\mu\text{m}$  using dual-wavelength digital holography are presented. The two wavelengths are achieved by tuning a low-coherence laser diode within 2 nm. The developed system is currently operating under laboratory conditions and is not intended for field use. Measurements may be affected by vibration, wind, and temperature changes.

В настоящее время стоит вопрос оптимизации измерений по скорости и точности [1]. В частности, диапазоны от 10 до 100 мкм мы можем захватить с помощью двухдлинноволновой голографии.

Целью работы является визуализация и демонстрация профиля поверхности микрометровых эталонов с помощью цифровой двухдлинноволновой голографии.

Схема цифровой голографии в нашем случае основана на интерферометре Майкельсона, но вместо одного из зеркал располагается исследуемая поверхность.

Двухдлинноволновая голография позволяет определить перепады глубин неоднородностей в микрометровых диапазонах. Две волны образуют длину волны биения, имеющую частоту, равную разностной частоте. Для двух длин волн  $\lambda_1 = 407,383$  нм и  $\lambda_2 = 407,907$  нм длина волны биения составляет 317,2 мкм, что составляет максимальный перепад глубин 158,6 мкм. Работоспособность системы (рис. 1) проверена на эталонах ПРО-10 [3].

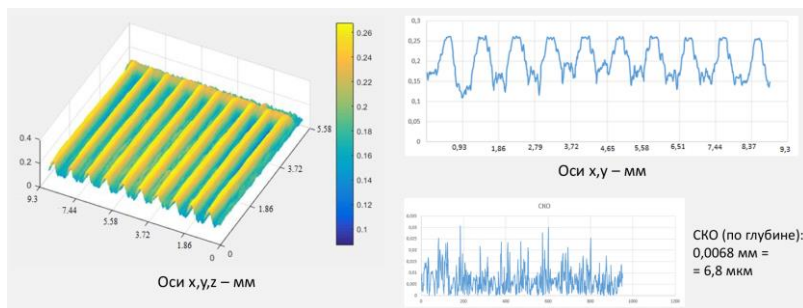


Рис. 1. Результаты измерений

Точность определения глубины определяется разностной частотой двух длин волн и битностью камеры (как правило, 8 бит), а точность определения линейных размеров определяется алгоритмами фильтрации (ядром медианной фильтрации), а также удалённостью исследуемой поверхности от приёмника – наблюдается пропорциональная зависимость размера пикселя в пространственной области в зависимости от этого удаления [4].

#### Список литературы

1. Lin X., et al. 3D visualization of droplet splash dynamics with high-speed digital holography // Experiments in Fluids. 2022. V. 63. No. 5. P. 86.
2. Nehmetallah G., Williams L., Nguyen T. Latest advances in single and multiwavelength digital holography and holographic // Augmented Reality and Its Application. 2022. P. 51.
3. Веб-ресурс <https://www.z-proton.ru/> (дата обращения: 11.12.2025).
4. Garaguly Z., Kozlovsky M., Kovács L. Comparison of numerical image reconstruction methods in holography // 2017 IEEE 30th Neumann Colloquium. IEEE, 2017. P. 000065-000070.

Д.Г. ДЕНИСОВ

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

**КОМПЛЕКС ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ  
ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ  
АНГСТРЕМНОГО УРОВНЯ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ,  
ЛАЗЕРНЫХ И ОПТИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ**

В МГТУ им. Н.Э. Баумана на базе инновационной многофункциональной оптической лаборатории создана линейка уникальных оптико-электронных приборов для диагностики качества астрономических зеркал, лазерных и оптических изделий. Инновационное оборудование позволяет реализовывать оперативный высокоточный контроль показателей качества оптических поверхностей в виде остаточной шероховатости ангстремного уровня, трещиноватого слоя, поверхностных дефектов, точек, царапин.

D.G. DENISOV

*Bauman Moscow State Technical University*

**THE COMPLEX OF OPTOELECTRONIC EQUIPMENT  
FOR DIAGNOSING THE QUALITY OF ANGSTROM-LEVEL  
SURFACES OF ASTRONOMICAL MIRRORS, LASER  
AND OPTICAL PRODUCTS**

The line of unique optoelectronic devices for quality diagnostics of astronomical mirrors, laser and optical products has been created at the Bauman Moscow State Technical University on the basis of an innovative multifunctional optical laboratory. The innovative equipment makes it possible to implement operational high-precision quality control of optical surfaces in the form of residual angstrom roughness, fractured layer, surface defects, dots, scratches.

В работе представлены уникальные научно-технические результаты опытно-конструкторских работ, проводимых в научно-исследовательском институте радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана совместно с Холдингом «Швабе» в рамках инвестиционного проекта по созданию инновационного отечественного высокотехнологичного оборудования и Минобрнауки России в рамках федерального проекта «Приборостроение». Уникальные по своим характеристикам комплексы диагностики качества оптических поверхностей ангстремного уровня созданы на базе многофункциональной лаборатории «Квантум Парка» в

рамках федерального проекта «Развитие отечественного приборостроения гражданского назначения для научных исследований». Комплекс «Ангстрем» (рис. 1а) является мобильным, портативным, высокотехнологичным с точки зрения своих реализуемых тактико-технических характеристик и уже готов к серийному производству. Переносной, многофункциональный оптический профилометр (рис. 1б) разработан совместно с Холдингом «Швабе» для оперативного неинвазивного контроля качества крупногабаритных поверхностей астрономических зеркал диаметром до 2000 мм и более. Созданное оборудование основано на авторских методиках, реализующих численные математические методы обратных задач, основанные на предложенных алгоритмах и методах дифференциального рассеяния оптического излучения, его пространственно-частотной фильтрации и частично-когерентной эллипсометрии [1]. Разработанные оптико-электронные высокоточные измерительные комплексы позволяют реализовывать высокоточный комплексный контроль параметров качества поверхностей оптических изделий как в процессе их формообразования, так и эксплуатации в широком диапазоне пространственных частот поверхностных неоднородностей с высотными размерами от долей нанометров до микрометров с возможностью селекции на классы, группы и категории. Полученные результаты являются уникальными и запатентованными в виде изобретений. Достигнутая погрешность измерения поверхностей ангстремного уровня не превышает сотых долей от номинальных значений, некоторые данные приведены в табл. 1.



а

б

Таблица 1. Некоторая выборка из многочисленных измерений

| Образец | Исходное СКО/<br>Измеренное СКО |
|---------|---------------------------------|
| 1       | 0.42 нм/ 0.44 нм                |
| 2       | 0.39 нм /0.4 нм                 |
| 3       | 0.41 нм/0.42 нм                 |

Рис. 1. Фотографии внешнего вида созданных комплексов: «Ангстрем» (а), профилометр (б)

## Список литературы

1. Денисов Д.Г. // Прикладная физика. 2022. № 1. С. 89-96.



**Д.Р. МАНУЧАРОВ, П.В. ПАВЛОВ**

*Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина,  
Воронеж*

## **ЛАЗЕРНАЯ МЕТОДИКА ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКИ БИОЗАГРЯЗНЕНИЯ АВИЦИОННОГО ТОПЛИВА**

Разработана методика определения степени биозагрязнения авиационного топлива, с учётом рекомендаций IATA и зарубежного стандарта ASTM-6964. Данная методика основана на использовании метода спекл-структур оптического излучения. Определены пороги количественной оценки для принятия решения оператором. Предлагаемое решение может стать физической основой для создания новейших средств контроля биозагрязнения авиатоплива.

**D.R. MANUCHAROV, P.V. PAVLOV**

*Air Forces Academy named after Prof. N.E. Zhukovskiy and Yu.A. Gagarin, Voronezh*

## **LASER METHOD FOR RAPID DIAGNOSTICS OF BIOCONTAMINATION IN AVIATION FUEL**

A method has been developed for determining the degree of biocontamination in aviation fuel, taking into account the recommendations of IATA and the foreign standard ASTM-6964. This method is based on the use of the speckle-structure optical emission technique. Thresholds for quantitative assessment have been defined to aid operator decision-making. The proposed solution could serve as the physical basis for creating the latest means of aviation fuel biocontamination control.

Своевременное обнаружение биозагрязнения авиационного топлива на всех стадиях его жизненного цикла является актуальной научно-технической задачей.

Важно отметить, что в Государственной авиации Российской Федерации жёсткие требования к чистоте топлива регламентированы внутренними инструкциями, ГОСТами, а касаясь биозагрязнения, только проверкой биостойкости топлива согласно ГОСТ 9.023-74. Международные стандарты, ASTM D6469 и IATA указывают на критическую важность мониторинга развития микроорганизмов. В связи с этим разработана отечественная методика, построенная на использовании способа и устройства, принцип действия которых основан на использовании метода спекл-структур оптического излучения, способная определять уровень биозагрязнения авиационного топлива [1].

Суть методики заключается в анализе параметров регистрируемых спекл-фотографий, регистрируемых при прохождении спекл-поля через структуру контролируемой пробы авиатоплива. Апробация методики осуществлялась на заранее подготовленных пробах с концентрацией микромицетов *Normospora resiniae* от  $10$  до  $10^4$  КОЕ/л. В результате экспериментальных исследований установлено, что за десять минут регистрации спекл-фотографий с использованием алгоритмов корреляционного анализа вероятность пропуска микроорганизмов от пробы с минимальной концентрацией составила  $10^{-3}$ , что подтверждает возможность интегрирования данной методики в систему мониторинга состояния авиационного топлива на этапах эксплуатации и хранения. На рис. 1 согласно разработанной методики и учёта рекомендаций зарубежных документов, регламентирующих количественную оценку биозагрязнения, было выделено три уровня.

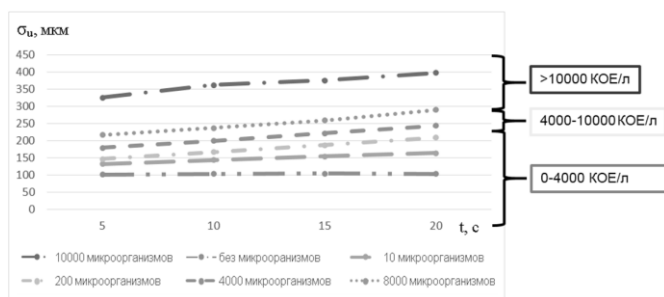


Рис. 1. График зависимости среднеквадратического отклонения оптической разности хода пар волн  $\sigma_u$  от времени  $t$  с указанием колониеобразующих единиц на литр топлива

Безопасный (до 4000 КОЕ/л), умеренный, где необходимо участить контроль за технической чистотой топлива (4000 - 10000 КОЕ/л) и критический, когда необходимо принимать меры по очистке топливной системы воздушного судна [2].

#### Список литературы

1. Павлов П.В., Манучаров Д.Р. и др. Патент № 2845640. Способ определения биозагрязнения авиационного топлива. № 2024106153; заявл. 05.03.2024; опубл. 25.08.2025, Бюл. № 24.
2. International Air Transport Association. Guidance material on microbiological contamination in aircraft fuel tanks. 4<sup>th</sup> ed. Montreal : IATA, 2020.

А.В. КОХАНОВ<sup>1,2</sup>, И.Н. НОВИКОВ<sup>1</sup>, А.А. ЕРОФЕЕВА<sup>1</sup>,  
Г.С. БЕЛОТЕЛОВ<sup>1</sup>, Д.В. СУТЫРИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических  
и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская обл.*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИН ВОЛН В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ ПРИ ПОМОЩИ СПЕКЛ-ПАТТЕРНОВ, СФОРМИРОВАННЫХ НА ИНТЕГРИРУЮЩЕЙ СФЕРЕ**

Приведены результаты экспериментов по измерению длины волны лазерного излучения в оптическом диапазоне с использованием спекл-паттернов, формируемых при рассеянии излучения в интегрирующей сфере. Продемонстрирована стабилизация спекл-изображений от воздействия внешних факторов и определена разрешающая способность метода, составившая не более 70 фм на длине волны 674 нм.

A.V. KOHANOV<sup>1,2</sup>, I.N. NOVIKOV<sup>1</sup>, A.A. EROFEEVA<sup>1</sup>,  
G.S. BELOTELOV<sup>1</sup>, D.V. SUTYRIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering,  
Mendeleevo, Moscow region*

<sup>2</sup>*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*

## **MEASUREMENT OF WAVELENGTHS IN THE OPTICAL RANGE USING SPECKLE PATTERNS FORMED ON AN INTEGRATING SPHERE**

The results of experiments on measuring the wavelength of laser radiation in the optical range using speckle patterns formed by scattering radiation in an integrating sphere are presented. Stabilization of speckle images against external perturbations is achieved and the method demonstrates a resolution of no more than 70 fm at a wavelength of 674 nm.

Измерение длины волны излучения играет ключевую роль в метрологии, фотонике, лазерной медицине, телекоммуникации и многих других областях [1]. В настоящее время особое внимание привлекает простая в своей реализации спекл-методика измерений [2], основанная на анализе интерференционной картины, формируемой при освещении когерентным светом случайно-неоднородных объектов. Пример такой картины, называемой спекл-паттерном, приведён на рис. 1. Широкое развитие алгоритмов машинного зрения сделало осуществимым

распознавание и сравнение спекл-картин, значительно повысив эффективность указанного метода. В мировой практике существуют эксперименты, демонстрирующие разрешающую способность измерения длины волны на уровне или даже выше существующих аналогов, реализованных на классических схемах, в основе которых лежат дифракционные решётки и интерферометры [3]. В настоящей работе представлена возможность использования спекл-картин, получаемых при рассеянии лазерного излучения на интегрирующей сфере, для измерения его длины волны.

Целью работы является получение информативных изображений спекл-паттернов на ПЗС-камере, их стабилизация от влияния негативных факторов, таких как флуктуации поляризации и интенсивности лазерного излучения, а также тепловое расширение внутренней поверхности интегрирующей сферы. На рис. 2 приведена схема экспериментальной установки. Для контроля поляризационного состояния излучения была реализована система подготовки оптического пучка. Для термостатирования интегрирующей сферы изготовлен модуль температурной стабилизации, использующий элемент Пельтье, управляемый ПИД-регулятором.

Разработанная экспериментальная установка обеспечила долговременную стабильность спекл-паттерна, необходимую для определения однозначной корреляции спекл-картины с длиной волны рассеиваемого лазерного излучения. Разрешающая способность системы составила 70 фм для длины волны излучения 674 нм.

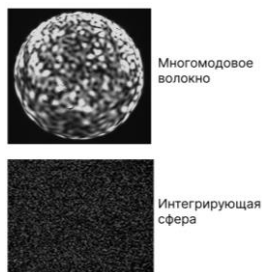


Рис. 1. Примеры спекл-изображений

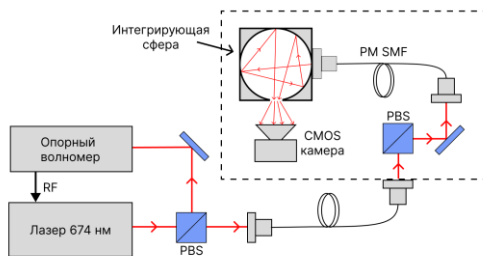


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

#### Список литературы

1. Slyusarev S.N. // Almanac of Modern Metrology. 2016. No. 8. P. 130-147.
2. Facchin M. // PhD Thesis. University of St Andrews. 2023.
3. Gupta R.K., Bruce G.D., Powis S.J., Dholakia K. // Laser & Photonics Reviews. 2020. V. 14.

И.М. АХМЕДЖАНОВ, Д.В. БАРАНОВ, О.В. ТИХОНЕВИЧ,  
Б.А. УСИЕВИЧ

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

## **ЭФФЕКТ СПЕКТРАЛЬНОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЕ С ИЗМЕНЯЕМОЙ АПЕРТУРОЙ**

Проведено экспериментальное исследование эффекта спектрального смещения и переключения в оптической схеме с изменяемой щелевой апертурой. Получена зависимость спектра излучения широкополосного источника света в дальней зоне от размера апертуры. При ширине апертуры меньше размера области пространственной когерентности зафиксированы резкие изменения средней длины волны спектра источника в сторону как синей, так и красной области спектра. Аналогичный эксперимент был проведён с лазерными источниками. Обнаружены скачки в функции пропускания щелевой апертуры в зависимости от её ширины для когерентных и некогерентных источников.

I.M. AKHMEDZHANOV, D.V. BARANOV, O.V. TIKHONEVICH,  
B.A. USIEVICH

*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*

## **PHENOMENON OF SPECTRAL SWITCH IN OPTICAL SCHEME WITH VARIABLE APERTURE**

An experimental study of the effect of spectral shift and switching in an optical system with a variable slit aperture was conducted. The dependence of the radiation spectrum of a broadband light source in the far field on the aperture size was obtained. When the aperture width is less than the size of the spatial coherence region, sharp changes in the average wavelength of the source spectrum toward either the blue or red regions of the spectrum were observed. A similar experiment was conducted with laser sources. Jumps in the transmission function of a slit aperture depending on its width have been detected for both coherent and incoherent sources.

Явление спектрального сдвига, обусловленное корреляционными свойствами источника, то есть эффект Вольфа, составляет предмет как теоретических, так и экспериментальных исследований [1 - 4]. Было показано, что спектр частично когерентного излучения в дальней зоне ограничивающей апертуры смещается либо в сторону меньших частот (красное смещение), либо в сторону больших частот (синее смещение) по сравнению со спектром источника [5, 6]. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование эффекта спектрального

переключения в дальней зоне щелевой апертуры с использованием когерентных и некогерентных источников.

Оптическая схема эксперимента состоит из источника оптического излучения, щелевой апертуры и оптоволоконного спектрометра [4]. Зависимость спектрального смещения от ширины щелевой апертуры в схеме с галогенной лампой представлена на рис. 1. В диапазоне ширины до 8 мкм наблюдаются резкие изменения средней волны спектра лампы, размах колебаний достигает 50 нм. Для лазерных источников с длинами волн 532 и 633 нм были получены зависимости интенсивности света, нормированной на ширину апертуры, от ширины апертуры на оптической оси экспериментальной схемы. Результат представлен на рис. 2. Для сравнения там же приведены аналогичные зависимости для галогенной лампы на длинах волн 532 и 633 нм. В том же диапазоне ширины апертуры до 8 мкм наблюдаются резкие изменения функции пропускания.

Необходимо отметить, что теоретические расчёты в работе [1] выполнены для идеальной апертуры. В нашем случае использовалась щелевая апертура конечной толщины. Полученные экспериментальные результаты позволяют предположить, что зарегистрированный эффект спектрального переключения может быть проявлением волноводного эффекта на используемой апертуре.

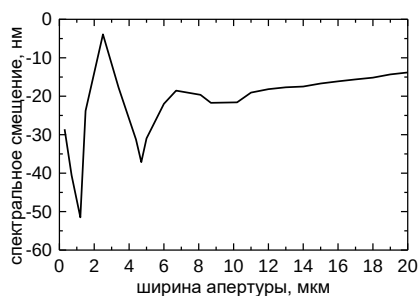


Рис. 1. Спектральное смещение для галогенной лампы

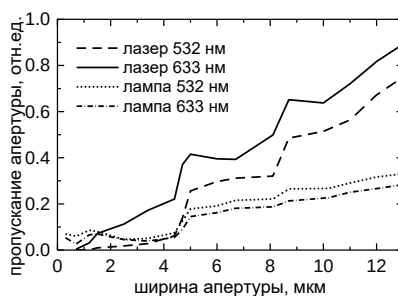


Рис. 2. Нормированная интенсивность после прохождения апертуры

#### Список литературы

1. Foley J.T. // Opt. Commun. 1990. V. 75 (5, 6). P. 347-352.
2. Foley J.T., Wolf E. // J. Opt. Soc. Am. A. 2002. V. 19 (12). P. 2510-2516.
3. Kandpal H.C. // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2001. V. 3. P. 296-299.
4. Ахмеджанов И.М., Баранов Д.В., Тихонович О.В., Усиевич Б.А. // Оптический журнал. 2025. Т. 92 (12). С. 106-110.
5. Pu J., et al. // Opt. Commun. 1999. V. 162. P. 57-63.
6. Wolf E., James D.F.V. // Rep. Prog. Phys. 1996. V. 59. P. 771-818.

Н.А. ПУТИЛИН<sup>1,2</sup>, С.С. КОПЕНКИН<sup>1,2</sup>, А.Н. ПУТИЛИН<sup>1,2</sup>,  
Ю.П. БОРОДИН<sup>1,2</sup>, С.Е. ДУБЫНИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет геодезии и картографии

<sup>2</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

## **ВОЛНОВОДНАЯ МУЛЬТИПЛИКАЦИЯ ЛУЧЕЙ В СХЕМАХ С НАЛОЖЕННЫМИ И ДВУХСТОРОННИМИ ДИФРАКЦИОННЫМИ РЕШЁТКАМИ**

Приведены результаты исследования работы волноводных дифракционных перископов с двумерной мультипликацией лучей на двухсторонних и наложенных дифракционных решётках. Проанализированы различные варианты схем, исследованы экспериментально изготовленные образцы с двухсторонними рельефно-фазовыми дифракционными элементами. Варианты волноводных дифракционных перископов рассматривались исходя из их применения в системах дополненной реальности.

N.A. PUTILIN<sup>1,2</sup>, S.S. KOPENKIN<sup>1,2</sup>, A.N. PUTILIN<sup>1,2</sup>,  
Yu.P. BORODIN<sup>1,2</sup>, S.E. DUBYNIN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Moscow State University of Geodesy and Cartography

<sup>2</sup>Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

## **WAVEGUIDE MULTIPLICATION OF BEAMS IN SCHEMES WITH SUPERIMPOSED AND DOUBLE-SIDED DIFFRACTION GRATINGS**

The investigation of the operation of waveguide diffraction periscopes with two-dimensional ray multiplication on double-sided and superimposed diffraction gratings are presented. Various schemes of design are analyzed, and experimentally manufactured samples with double-sided relief-phase diffraction elements are studied. The options for waveguide diffraction periscopes were considered based on their application in augmented reality systems.

Системы дополненной реальности стали на данный момент уже классической областью применения для волноводных дифракционных перископов (ВДП) [1]. Основу большинства используемых схем составляют так называемые трёхголограммные схемы с последовательной мультипликацией выходного зрачка по двум координатам, это условно схема “HoloLens1” и с двухкоординатной мультипликацией выходного зрачка на наложенных голограммах, опять же условно – “WaveOptics”.

Однако необходимость улучшения энергетической эффективности схем является причиной появления всё новых вариантов схем подобных волноводных элементов. В частности, в последнее время возрос интерес к ВДП с двухсторонним расположением дифракционных элементов [2, 3]. Разработка новых вариантов технологии переноса рельефных решёток на волновод позволила более гибко формировать конфигурацию волноводных перископов.

Одним из основных отличий данного нового варианта ВДП является возможность заменить наложенные дифракционные решётки (ДР) по типу схемы Wave Optics на две одномерные решётки, расположенные на разных сторонах волновода. Оба варианта достаточно схожи, векторные диаграммы их работы показаны на рис. 1а, б, однако для наложенных решёток  $D_1$  и  $D_2$  помимо основных направлений дифракции в действительности существует ещё и вертикальная составляющая – вектор  $D_{12}$  («муаровые решётки»).

Изготовление ВДП с двухсторонними ДР связано с рядом сложностей, но даёт возможность изменения известных схем. В этой работе представлены особенности работы таких схем, в частности на рис. 1г представлен изготовленный экспериментально ВДП, у которого размножающая область (2) выполнена в виде двухсторонних дифракционных решёток. Для предотвращения вывода из волновода света на области размножения (рис. 1д) можно использовать отражательные покрытия. Но особенно интересен вариант с использованием двухсторонних решёток с ассиметричным профилем рельефа (только +1 порядка, что для двусторонних ДР сделать легче), при падении на эти решётки лучи размножаются, но не выводятся (рис. 1в, е). Таким образом, благодаря двустороннему расположению волноводных дифракционных элементов появляется возможность модификации схем дисплеев дополненной реальности на базе волноводных голографических перископов с целью не только улучшения их световой эффективности, но и выполнения специализированных преобразования оптических полей полезных в области осветительных и интерференционных систем.



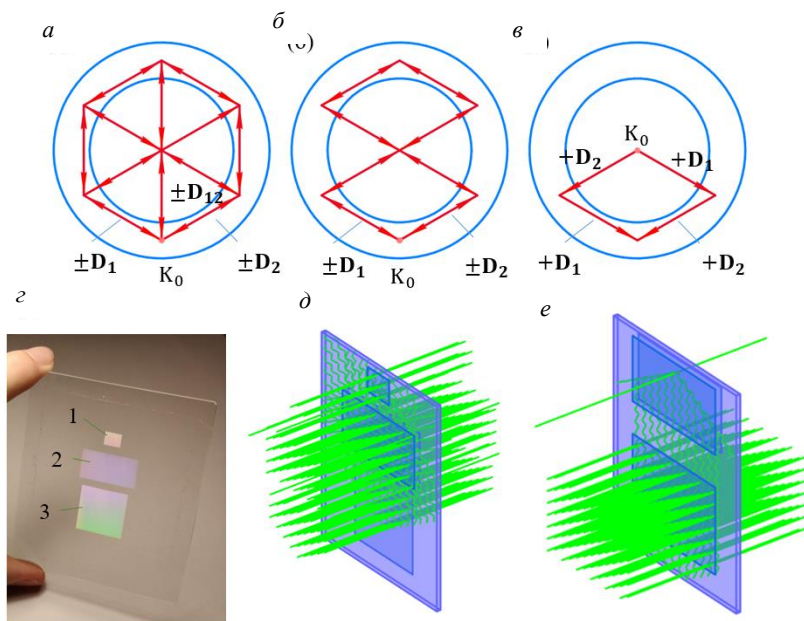


Рис. 1. Векторные схемы дифракции для различных схем ВГП.– наложенные ДР; (а), двухсторонние ДР (б), двухсторонние с +1 порядками (в), двухсторонний ВДП: 1 – вводная ДР, 2 – двухсторонние ДР, 3 – выводная ДР (з); вывод лучей в области размножения для схемы типа д (д); новая схема с двухсторонними ДР с +1 порядками (е)

#### Список литературы

1. Kress B.C., Pace M. // Light: Advanced Manufacturing. 2022. V. 3. No. 4. P. 771-801.
2. Wang L., Zhao Y., et al. // Optics Express. 2024. V. 32. No. 27. P. 48072-48092.
3. Callens M.K. Dual-path disparity sensor // US Patent 20240179284A1. Publ. May 30, 2024.

Т.А. ГАТАТДИНОВ, Д.А. РЫМОВ, Е.Ю. ЗЛОКАЗОВ  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **АНАЛИЗ СПОСОБОВ ФОРМИРОВАНИЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СИСТЕМЕ С ГОЛОГРАФИЧЕСКИМ ВОЛНОВОДОМ**

Данная работа посвящена исследованию различных методов компьютерного синтеза голограмм Френеля для формирования изображений в системах дополненной реальности на основе голографического волноводного перископа. В работе получены результаты экспериментального восстановления голограмм Френеля в когерентной оптической системе на основе жидкокристаллического пространственно-временного модулятора света и голографического волновода.

T.A. GATATDINOV, D.A. RYMOV, E.Yu. ZLOKAZOV  
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*

## **ANALYSIS OF HOLOGRAPHIC IMAGE FORMATION METHODS IN A SYSTEM WITH A HOLOGRAPHIC WAVEGUIDE**

This research investigates various computational methods for generating Fresnel holograms for image formation in augmented reality systems employing a holographic waveguide periscope. Experimental results are presented for the reconstruction of Fresnel holograms within a coherent optical system based on a liquid-crystal spatial light modulator and a holographic waveguide.

Целью данной работы является экспериментальное исследование восстановления изображений 3D-сцен в голографическом волноводном перископе. Система формирования изображений состояла из жидкокристаллического пространственно-временного модулятора света (ЖК ПВМС) с размером пиксела  $7.8 \times 7.8$  мкм, лазера с длиной волны 561 нм и голографического волновода (рис. 1).

В работе исследовались 3D-сцены, состоящие из трёх объектных плоскостей со сплошными изображениями цифр «9», «7» и «3». Расстояния между плоскостями изображения и плоскостями голограмм составляли 0.45, 0.6 и 0.85 м соответственно. Рассматривались следующие методы синтеза компьютерных голограмм: алгоритм Герцберга–Сэкстона [1], параллельный алгоритм «пинг-понг» [2] и нейросетевой метод формирования голограмм 3D-сцен 3D-CGH-Net [3]. Для голограмм,

синтезированных алгоритмом Герчберга–Сэкстона и алгоритмом «пинг-понг» для сглаживания контуров и снижения фонового шума применялся метод временного мультиплексирования: на ПВМС последовательно выводились голограммы с различными фазовыми распределениями [4]. Также был рассмотрен метод динамического вывода на ПВМС голограмм, содержащих плоские сцены, расположенные в различных плоскостях.

Рис. 1. Схема установки: лазер (L), деспеклер (SR), пин-холл (PH), коллиматор (CL), ЖК ПВМС (SLM), светоделительный кубик (BS), голографический волновод (W), камера (C)

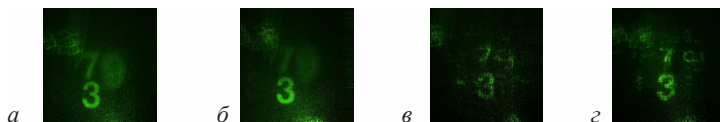
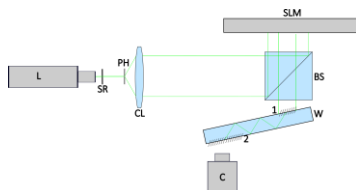


Рис. 2. Примеры восстановленных изображений для плоскости с изображением цифры «3» (0.85 м): алгоритм Герчберга–Сэкстона (а), алгоритм «пинг-понг» (б), 3D-CGH-Net (в), 3D-CGH-Net с последовательным выводом голограмм на ПВМС (г)

В экспериментах наиболее хорошо показал себя алгоритм Герчберга–Сэкстона (рис. 2). Параллельный алгоритм «пинг-понг» показал сравнимые результаты. Наихудший результат показали голограммы, синтезированные нейросетевым методом: на поле возникает периодическая структура из ярких пикселей, ухудшающая качество изображений. Динамический вывод голограмм позволяет повысить качество изображений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 22-79-10340-П.

#### Список литературы

1. Gerchberg W., Saxton R. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures // *Optik (Stuttgart)*. 1972. V. 35. P. 237-246.
2. Piestun R., Spektor B., Shamir J. Wave fields in three dimensions: analysis and synthesis // *J. Opt. Soc. Am. A*. 1996. V. 13. P. 1837-1848.
3. Rymov D.A., Svistunov A.S., Starikov R.S., Shifrina A.V., Rodin V.G., Evtkhiev N.N., Cheremkhin P.A. 3D-CGH-Net: Customizable 3D-hologram generation via deep learning // *Optics and Lasers in Engineering*. 2025. V. 184. P. 1.
4. Lee B., Kim D., Lee S., et al. High-contrast, speckle-free, true 3D holography via binary CGH optimization // *Sci. Rep.* 2022. V. 12, P. 2811.

Д.И. КАШАПОВА<sup>1,2</sup>, Д.В. ПРОКОПОВА<sup>1</sup>, С.П. КОТОВА<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

<sup>2</sup>Самарский национальный исследовательский университет имени С.П. Королёва

## **КАЧЕСТВО ФОРМИРОВАНИЯ СПИРАЛЬНЫХ ПУЧКОВ СВЕТА ГОЛОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

В работе изучается влияние профиля штриха решётки при голографическом формировании спиральных пучков света в форме замкнутых кривых. Произведена оценка качества распределения интенсивности сформированных пучков и энергетической эффективности.

D.I. KASHAPOVA<sup>1,2</sup>, D.V. PROKOPOVA<sup>1</sup>, S.P. KOTOVA<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Samara Branch of Lebedev Physical Institute of the RAS

<sup>2</sup>Samara National Research University

## **THE QUALITY OF THE FORMATION OF SPIRAL BEAMS OF LIGHT BY THE HOLOGRAPHIC METHOD**

The work studies the effect of the lattice stroke profile during the holographic formation of spiral light beams in the form of closed curves. The quality of the intensity distribution of the formed beams and energy efficiency were evaluated.

Широкое применение в прикладной оптике и фотонике находят спиральные пучки света (СПС) – световые поля, сохраняющие структуру интенсивности с точностью до масштаба и вращения при распространении и фокусировке [1]. В рамках данной работы рассматриваются СПС в форме замкнутого контура подчиняющиеся условию квантования, которое устанавливает взаимосвязь между площадью пучка ( $S$ ), гауссовым параметром ( $\rho$ ) и параметром квантования, определяющим числом нулей комплексной амплитуды (оптических вихрей) внутри контура ( $N$ ) [1]. Для формирования подобных полей удобно использовать голографический метод, так как он прост в реализации при помощи компьютерных расчётов голограмм и их дальнейшей физической реализации с помощью пространственных модуляторов света.

В работе исследуется качество восстановления СПС, сформированных двумя видами голограмм, которые отличаются профилем штриха дифракционной решётки: синусоидальный [2] и треугольный [3].

В ходе эксперимента были сформированы спиральные пучки света (СПС) с различными параметрами квантования ( $N = 20, 50, 70, 100, 120$ ) при помощи двух типов голограмм. Примеры зарегистрированных распределений интенсивности для СПС в форме звезды с  $N = 120$  представлены на рис. 1. При увеличении параметра квантования меняется структура распределения интенсивности спирального пучка, становится более чёткой и однородной. Качественный анализ демонстрирует, что пучки, созданные с использованием голограммы с треугольным профилем штриха, обладают более однородной структурой по сравнению с пучками, восстановленными с голограммы с синусоидальным штрихом. Этот эффект может быть связан с различием в распределении энергии по порядкам дифракции – треугольные голограммы направляют большую часть светового сигнала в основной (+1) дифракционный порядок.

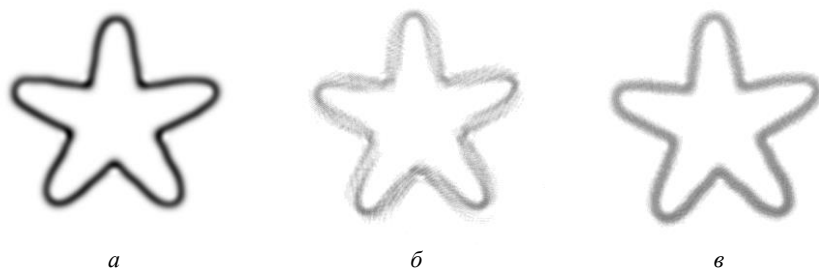


Рис. 1. Расчётное распределение интенсивности спирального пучка света (а), пучок, сформированный от синусоидальной голограммы (б), пучок, сформированный от треугольной голограммы (в) ( $N = 120$ )

Количественные измерения подтверждают качественные наблюдения: энергетическая эффективность для голограмм с треугольным профилем штриха решётки оказался в два раза выше, чем для синусоидальных. Кроме того, математические критерии – среднеквадратичная ошибка (MSE), пиковое отношение сигнал/шум (PSNR) и коэффициент структурного подобию (SSIM) отличаются на 10 % при использовании голограмм с синусоидальным штрихом решётки по сравнению с голограммами, имеющими треугольный штрих.

#### *Список литературы*

1. Абрамочкин Е.Г., Волостников В.Г. // М.: Физматлит. 2010.
2. Афанасьев К.Н., Кишкин С.А. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14 (4) С. 184-188.
3. Аксенов В.П. и др. // Оптика и спектроскопия. 2018. Т. 124 (2). С. 275-279.

А.В. ЧЕРНЫХ, В.Р. ГРЕСЬКО, Т.В. РЕЗЦОВ, М.М. СЕРГЕЕВ,  
Н.В. ПЕТРОВ

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **РАЗРАБОТКА ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО МИКРОСКОПА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ АНИЗОТРОПИИ ПЛЁНОК ZnO:Ag**

Разработан поляризационный голографический микроскоп на основе интерферометра Маха-Цендера, поляризационного матричного фотодетектора, и трёх пар лазерных модулей (450, 532 и 660 нм). На фотодетекторе одновременно регистрируются шесть цифровых голограмм из которых можно восстановить комплексную матрицу Джонса. Предложенный микроскоп использовался для исследований поляризационной и фазовой анизотропии обработанных плёнок ZnO с наночастицами серебра.

A.V. CHERNYKH, V.R. GRESKO, T.V. REZTSOV, M.M. SERGEEV,  
N.V. PETROV

*ITMO University, Saint Petersburg*

## **DEVELOPMENT OF A POLARIZATION HOLOGRAPHIC MICROSCOPE FOR STUDYING THE ANISOTROPY OF ZnO:Ag FILMS**

Polarization holographic microscope was developed based on a Mach-Zehnder interferometer, a polarization matrix photodetector, and three pairs of laser modules (450, 532, and 660 nm). The photodetector simultaneously records six digital holograms, from which a complex Jones matrix can be reconstructed. The proposed microscope was used to study the polarization and phase anisotropy of treated ZnO films with Ag nanoparticles.

Перспективной платформой для направлений фотоники и электроники являются золь-гель плёнки оксида цинка (ZnO), в том числе легированные серебром (ZnO:Ag). Интерес к этим материалам обусловлен возможностью их осаждения на больших площадях, широкими возможностями настройки оптического отклика, а также возникновением плазмонных резонансов, вносимых наночастицами серебра [1, 2]. Оксид цинка обладает высокой прозрачностью в видимой области спектра, значительной подвижностью электронов и широкой запрещённой зоной, что делает его одним из важнейших материалов для полупроводниковой

индустрии. Введение серебряных наночастиц позволяет контролировать функциональные свойства, включая оптические и диэлектрические характеристики, благодаря эффекту локального поверхностного плазмонного резонанса.

Цифровая голографическая микроскопия (ЦГМ) является быстрым инструментом количественной фазовой визуализации и может применяться в задачах контроля лазерной обработки. Методы ЦГМ позволяют не только регистрировать фазовое запаздывание, но и фиксировать изменение поляризационной анизотропии. Прецизионный контроль крайне важен при обработке плёнок ZnO:Ag фемтосекундным импульсным излучением.

В работе представлена модифицированная версия поляризационного голографического микроскопа [3] для исследования обработанных плёнок ZnO:Ag на трёх длинах волн: 450, 532 и 660 нм. На используемом поляризационном матричном фотодетекторе (FLIR BFS-U3-51S5P-C) одновременно регистрируется шесть голограмм для одной длины волны освещения, из которых восстановлены матрицы Джонса.

Были проведены измерения цифровых голограмм плёнки ZnO:Ag с треками, обработанными под углами плоскости поляризации от 0 до 90 градусов импульсами 224 фс с длиной волны 515 нм со средней плотностью энергии 56 мДж/см<sup>2</sup>. Восстановлены матрицы Джонса треков на длинах волн 450, 532 и 660 нм. С помощью восстановленных матриц Джонса определён поворот быстрой оптической оси, который свидетельствует о переориентации наночастиц серебра. Определены значения линейного и кругового дихроизма, а также фазового запаздывания света на обработанных треках плёнок ZnO:Ag на трёх длинах волн. Полученные результаты показывают, что разработанный поляризационный голографический микроскоп способен регистрировать изменения поляризационного дихроизма при незначительных относительных изменениях амплитуды пропускания порядка 2 - 7 % и может быть применён для контроля при лазерной модификации плёнок ZnO:Ag.

Авторы выражают благодарность за финансовую поддержку Министерству науки и высшего образования Российской Федерации (№ FSER-2025-0007).

#### *Список литературы*

1. Gündoğdu Y., et al. // Opt. Laser Technol. 2024. V. 170. P. 110291.
2. Gresko V.R., et al. // Nauchno-tekhn. Vestn. Inf. Tekhnol. Mekh. 2024. V. 24. No. 3. P. 384.
3. Reztsov T.V., et al. // Polymers 2025. V. 17. No. 13. P. 1849.

П.А. ИВАНОВ

*Ярославский государственный технический университет*

**НЕКОТОРЫЕ ТИПЫ ИНВАРИАНТНЫХ  
КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФИЛЬТРОВ  
В ЗАДАЧАХ РАЗЛИЧЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ  
ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ИСКАЖЕНИЙ**

Приводятся результаты моделирования на ПЭВМ распознавания двумерных полутоновых изображений, подвергнутых геометрическим преобразованиям, а также межклассовое распознавание с помощью некоторых типов корреляционных фильтров, оптимальных по видам геометрических искажений с точки зрения параметров корреляционных пиков.

P.A. IVANOV

*Yaroslavl State Technical University*

**SOME TYPES OF INVARIANT CORRELATION FILTERS  
IN PROBLEMS OF IMAGES RECOGNITION  
FOR DIFFERENT DISTORTIONS**

The results of PC modeling of 2D grayscale images with geometrical deformations and several classes' recognition with the usage of some types of invariant correlation filters that are optimal in dependence of type of distortion according to output correlation peak parameters are given.

Популярным методом решения задачи корреляционного распознавания изображений, подвергнутых геометрическим преобразованиям (поворот, сдвиг, изменение масштаба, сложное искажение формы), является применение инвариантных корреляционных фильтров (КФ) [1] как эталонных объектов в схемах оптоэлектронных корреляторов изображений [2]. Однако, невозможно выбрать универсальный фильтр-для каждого типа искажений требуется подбирать свой, в зависимости от типа геометрического искажения с точки зрения оптимальных параметров выходного корреляционного пика (острота пика, уровень деградации по отношению к максимуму и другие). В данной работе в качестве объекта исследования использовались различные типы КФ, с целью определения наилучшего по вышеуказанным параметрам для каждого типа искажения. Были проведены эксперименты по компьютерному моделированию



распознавания изображений, подвергнутых вышеупомянутым геометрическим преобразованиям. Для каждого случая вычислялись значения корреляционных функций набора входных изображений с фильтром, нормированные на величину максимального пика (количественные характеристики корреляции). Пример использования такого фильтра для преобразования изменения масштаба приведён в табл. 1.

Таблица 1. Результаты моделирования (изменение масштаба) для MINACE-фильтра

| Количество исходных изображений | Шаг изменения масштаба, проценты | Разрешение (размер изображений), пиксели | PSR_SD, ед. | PSR_AV, ед.  | Количество ошибок, ед. |
|---------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------|-------------|--------------|------------------------|
| 90                              | -1                               | 64x64                                    | 14.5– 43.0  | 33.0 – 185.0 | 0                      |
|                                 |                                  | 32x32                                    | 5.4 – 11.4  | 6.5 – 22.0   | 8                      |
| 55                              | +1                               | 64x64                                    | 21.8 – 25.1 | 17.5 – 30.0  | 0                      |
|                                 |                                  | 32x32                                    | 18.5 – 21.0 | 19.5 – 26.5  | 0                      |
| 45                              | -2                               | 64x64                                    | 16.0 – 40.0 | 24.5 – 98.0  | 0                      |
|                                 |                                  | 32x32                                    | 5.0 – 14.5  | 5.0 – 20.0   | 12                     |
| 27                              | +2                               | 64x64                                    | 26.0 – 47.0 | 14.0 – 36.0  | 0                      |
|                                 |                                  | 32x32                                    | 19.7 – 31.0 | 19.0 – 35.0  | 0                      |

Результаты моделирования позволяют надеяться на успешное применение КФ для подобного класса задач.

#### *Список литературы*

1. Vijaya Kumar B.V.K. Tutorial survey of composite filter design for optical correlators // Appl. Opt. 1992. V. 31. P. 4773-4801.
2. Евтихийев Н.Н., Евтихьева О.А., Компанец И.Н., Краснов А.Е., Кульчин Ю.Н., Одинокоев С.Б., Ринкевичюс Б.С. Информационная оптика. М.: Издательство МЭИ. 2000.

Д.В. ПАВЛЕНКО, Р.С. СТАРИКОВ, Ф.А. УШАКОВ  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **НЕЙРОСЕТЕВАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПО СИГНАЛАМ СВЁРТКИ, ФОРМИРУЕМЫМ ОПТИКО-ЦИФРОВОЙ СИСТЕМОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ**

Приведены результаты экспериментов по нейросетевой классификации бинарных контурных изображений объектов по сигналам свёртки, формируемым оптико-цифровой системой пространственной фильтрации. Достигнутая точность распознавания составляет  $\sim 98\%$  при снижении размерности распознаваемых изображений до  $32 \times 32$  пикселей.

D.V. PAVLENKO, R.S. STARIKOV, F.A. USHAKOV  
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*

## **NEURAL NETWORK CLASSIFICATION OF IMAGES BASED ON CONVOLUTION SIGNALS FORMED BY AN OPTO-DIGITAL SPATIAL FILTERING SYSTEM**

Experimental results are presented for the neural network classification of binary contour object images based on convolution signals formed by an opto-digital spatial filtering system. A recognition accuracy of  $\sim 98\%$  was achieved while reducing the dimensionality of the images to be recognized to  $32 \times 32$  pixels.

Гибридные оптико-цифровые нейронные сети, состоящие из комбинации оптического предускорителя (ОП) и свёрточной нейронной сети (СНС), являются одним из актуальных направлений в области обработки изображений [1]. При такой комбинации ОП выполняет функцию свёрточного слоя, снижающего размерность сигнала (например, [2]). В данной работе, ОП реализован в виде системы пространственной фильтрации с фильтром в области пространственных частот и выполняет предобработку входных изображений объектов, подвергнутых повороту (рис. 1а). Схема установки отображена на рис. 1б [3]. На схеме: твердотельный непрерывный лазер Pr:YLF с длиной волны 639 нм (Л); коллиматор (К), состоящий из двух линз, в совместной фокальной плоскости которых установлена микродиафрагма; две фурье-линзы (ФЛ) с фокусным расстоянием 500 мм; регистрирующий матричный фотодетектор (МФД) с разрешением  $7920 \times 6004$  отсчётов и линейным

размером пиксела 4.6 мкм; два микрозеркальных пространственно-временных модулятора света: ПВМС1 с разрешением  $1920 \times 1080$  отсчётов и линейным размером пиксела 10.6 мкм и ПВМС2 с разрешением  $2560 \times 1600$  отсчётов и размером пиксела 7.56 мкм. Ядром свёртки является функция того или иного вида, в качестве примера приведён вариант такой функции в виде набора концентрических колец (рис. 1б). Соответствующий импульсный отклик системы пространственной фильтрации формируется голографическим фильтром, реализуемым в виде компьютерно-синтезированной бинарной голограммы Фурье (рис. 1з). На выходе системы регистрируются выходные сигналы, пример которых представлен на рис. 1б (показана только область свёртки, используемая при дальнейшей обработке). Область свёртки соответствует размерности  $2048 \times 2048$  отсчётов, которая понижалась до  $32 \times 32$  отсчёта с помощью операции децимации, то есть прореживания отсчётов с заданным шагом. Достигнутая точность распознавания составляет  $\sim 98\%$ .

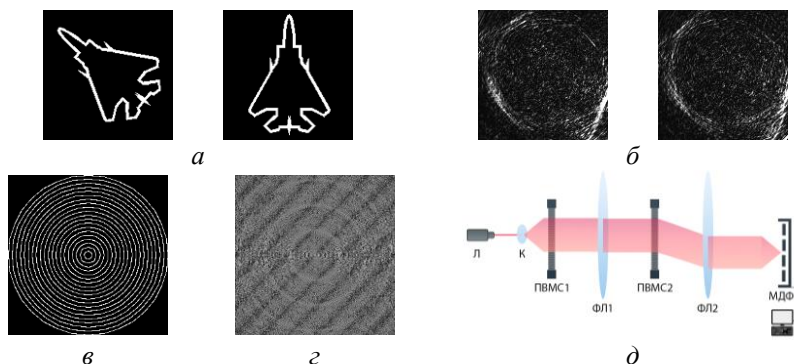


Рис. 1. Примеры входных изображений объектов (а), распознаваемые сигналы свёртки (б), вид ядра свёртки (в), голографический фильтр (з), схема установки (д)

#### Список литературы

1. Chen H., Lou S., Wang Q., Huang P., Duan H., Hu Y. Diffractive deep neural networks: Theories, optimization, and applications // *Applied Physics Reviews*. 2024. V. 11, No. 2. P. 021332.
2. Goncharov D.S., Zlokazov E.Yu., Petrova E.K., Starikov R.S. Processing the output signals of joint transform correlators using a pre-trained convolutional neural network // *Journal of Optical Technology*. 2025. V. 92 (2). P. 120-125.
3. Волков А.А., Злоказов Е.Ю., Керов А.А., Овчинников А.С., Павленко Д.В., Родин В.Г., Стариков Р.С., Ушаков Ф.А., Черёмхин П.А., Шифрина А.В. Оптико-цифровая система пространственной фильтрации для нейросетевых приложений // *Вестник НИЯУ МИФИ*. 2026.

М.В. ВЯЗОВЫХ, В.Д. КОЗЫРЕВ, А.А. КОВТУН, Н.А. ВЕРНИГОР,  
В.А. КЛЮЕВ

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

## **НЕЙРОСЕТЕВОЙ АЛГОРИТМ ПОВЫШЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ В ЛИДАРНЫХ СИСТЕМАХ**

Представлен нейросетевой алгоритм повышения вероятности распознавания перемещающихся объектов в лидарных данных при сложном фоне и переменном контрасте. Метод включает стабилизацию последовательных кадров, выделение динамических зон, разностные представления и адаптацию признаков к условиям съёмки. Для повышения надёжности применяется оценка неопределённости на основе байесовского приближения.

M.V. VYAZOVYKH, V.D. KOZYREV, A.A. KOVTUN,  
N.A. VERNIGOR, V.A. KLYUEV

*Bauman Moscow State Technical University*

## **NEURAL NETWORK ALGORITHM FOR INCREASING THE PROBABILITY OF RECOGNIZING MOVING OBJECTS IN LIDAR SYSTEMS**

The paper presents a neural network algorithm for improving the probability of recognizing moving objects in lidar data against complex backgrounds and variable contrast. The method includes stabilization of consecutive frames, dynamic zone extraction, difference representations, and adaptation of features to shooting conditions. To increase reliability, uncertainty estimation based on the Bayesian approximation is used.

Распознавание перемещающихся объектов в лидарных системах затрудняется из-за снижения контрастности отражённого сигнала, атмосферных воздействий и разреженности облака точек кадра лидара. Эти факторы приводят к росту ошибок детекции и трекинга и снижению вероятности корректного распознавания. Для повышения вероятности распознавания предлагается алгоритм, объединяющий стабилизацию последовательных облаков точек, выделение динамических областей и адаптивную нейросетевую обработку.

Стабилизация выполняется путём приведения облака точек предыдущего момента времени к координатам текущего, что позволяет

исключить влияние движения носителя (платформы). Далее формируется маска движения, отражающая статистически значимые перемещения, и строятся разностные представления в проекции «вид сверху», чувствительные к локальным изменениям структуры данных.

Нейросетевой модуль основан на современных методах обработки трёхмерных облаков точек лидара [1, 2] и использует адаптацию признаков к уровню контраста для повышения устойчивости при увеличении дальности работы устройства и усилении атмосферных искажений. Для повышения вероятности правильного распознавания применяется оценка неопределённости с использованием байесовского приближения, что позволяет корректировать пороги принятия решений при низкой информативности сигнала [3, 4]. Физические эффекты распространения лазерного излучения и атмосферных потерь учитываются по данным работ [5, 6]. Структурная схема алгоритма приведена на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема алгоритма

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по государственному заданию FSN-2025-0015.

#### *Список литературы*

1. Вязовых М.В., Козырев В.Д., Ковтун А.А., Соколовский В.А. Алгоритмы комплексирования телевизионных и тепловизионных изображений для повышения эффективности мультиспектрального распознавания объектов оператором // Контентант. 2025. Т. 24. № 2. С. 98-110.
2. Qi C.R., Su H., Mo K., Guibas L.J. PointNet: Deep Learning on Point Sets for 3D Classification and Segmentation // Proc. CVPR. 2017. P. 652-660.
3. Shi S., Guo C., Jiang L., Wang Z., Shi J., Wang X., Li H. PV-RCNN: Point-Voxel Feature Set Abstraction for 3D Object Detection // Proc. CVPR. 2020. P. 10529-10538.
4. Козырев В.Д. Алгоритмы предварительной обработки изображения для повышения характеристик распознавания объектов на основе нейронных сетей // Студенческая научная весна: Сборник тезисов докладов. 2023. С. 493-495.
5. Бокшанский В.Б., Бондаренко Д.А., Вязовых М.В. и др. Лазерные приборы и методы измерения дальности. М.: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2012.
6. Haider A., Pigniczki M., Koyama S., et al. A Methodology to model the rain and fog effect on the performance of automotive LiDAR sensors // Sensors. 2023. V. 23 (15) P. 1-25.

А.А. ВОЛКОВ, А.В. КОЗЛОВ, П.А. ЧЕРЁМХИН  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ПОДХОДОВ ПРИ ИЗВЛЕЧЕНИИ ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТРИЧНЫХ ФОТОСЕНСОРОВ**

Работа посвящена исследованию производительности современных архитектур глубоких нейросетей при автоматическом извлечении параметров шума матричных фотосенсоров на основе зарегистрированных изображений и метаданных камер. Рассмотрены различные архитектуры и предложены новые подходы.

A.A. VOLKOV, A.V. KOZLOV, P.A. CHEREMKHIN  
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*

## **A STUDY OF NEURAL NETWORK APPROACHES FOR THE EXTRACTION OF MATRIX PHOTSENSORS NOISE PARAMETERS**

The work is devoted to the study of the performance of modern deep neural network architectures in the automatic extraction of noise parameters of matrix photosensors based on registered images and camera metadata. Various architectures are considered and novel techniques are proposed.

Качество цифровых изображений зависит от уровня шума матричного фотосенсора, особенно в сложных условиях регистрации (малая экспозиция, быстропротекающие процессы, динамические внешние условия и другое), что может непосредственно сказываться на результативности цифровых методов обработки в компьютерном зрении, криминалистике, медицинской диагностике. Традиционные методы оценки шума фотосенсора требуют калибровки с использованием стандартных сцен (например, в соответствии со стандартом EMVA 1288 [1]), что ограничивает их практическое применение [2]. Современные архитектуры нейронных сетей позволяют преодолеть некоторые ограничения, обеспечивая автоматическое нахождение приближительных параметров шума из одного изображения [3].

Различные архитектуры демонстрируют существенные отличия по скорости, точности и интерпретируемости результатов [3]. Например, PGE-Net [4] построена на базе свёрточной нейронной сети с остаточными

связями; целевым выходом является оценка двух скалярных параметров в приближении Пуассон–Гауссова распределения шума. При этом часто модель шума при обучении не соответствует реальному шуму современных фотосенсоров, отсутствует достаточное количество размеченных наборов откалиброванных изображений для обучения, а также методы имеют высокую вычислительную сложность. Кроме того, в настоящее время не решена задача нейросетевого разделения шума фотосенсора и шума самого изображения [3].

В связи с этим предлагается двухэтапный метод, объединяющий сегментирующую сеть с блоком оценки параметров (рис. 1). Он предоставляет собой гибридный подход, позволяющий раздельно оценивать компоненты шума с опорой на представление шумов стандартом EMVA 1288.



Рис. 1. Схема предлагаемого двухэтапного метода оценки шумовых параметров матричных регистраторов

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 24-19-00898.

#### *Список литературы*

1. EMVA Standard 1288, Standard for Characterization of Image Sensors and Cameras.
2. Kozlov A.V., Rodin V.G., Starikov R.S., Evtkhiev N.N., Cheremkhin P.A. A Family of Methods Based on Automatic Segmentation for Estimating Digital Camera Noise: A Review // IEEE Sensors Journal. 2024. V. 24. P. 17353-17365.
3. Volkov A.A., Kozlov A.V., Cheremkhin P.A., et al. A Review of Neural Network-Based Image Noise Processing Methods // Sensors. 2025. V. 25 (19). P. 6088.
4. Byun J., Cha S., Moon T. FBI-Denoiser: Fast Blind Image Denoiser for Poisson-Gaussian Noise // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2021. P. 5768-5777.

Г.Р. САГАТЕЛЯН, Е.Р. ПИСКУНОВА, А.С. КУЗНЕЦОВ  
*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

## СРАВНЕНИЕ RGB- И XYZ-МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ЦВЕТА ИЗОБРАЖЕНИЯ

Разработана методика сравнения RGB- и XYZ-методов оценки цвета изображения. Представлена возможность идентификации цветов цветовой калибровочной меры с использованием оптического микроскопа.

G.R. SAGATELIAN, E.R. PISKUNOVA, A.S. KUZNETSOV  
*Bauman Moscow State Technical University*

## COMPARISON OF RGB AND XYZ IMAGE COLOR ESTIMATION METHODS

A method has been developed for comparing RGB and XYZ methods of image color estimation. The possibility of identifying the colors of a color calibration measure (CCM) using an optical microscope is presented.

Предлагается технология, основанная на теории цвета, благодаря которой удастся распознавать цвета на оптическом микроскопе без использования спектрометра. Компонентами цветовой калибровочной меры (ЦКМ) являются 98 цветных стёкол из набора светофильтров [1, 2]. Спектры оптических стёкол приведены в паспорте набора. Поэтому предлагается по спектрам рассчитать координаты  $x$ ,  $y$  стёкол марок СС1, КС10, ЗС8, СЗС23, ПС8, ЖС19, далее по разрабатываемой методике при использовании оптического микроскопа предлагается рассчитать координаты  $x$ ,  $y$  стёкол тех же марок.

Расчёт координат  $x$ ,  $y$  по спектрам, приведённым в паспорте набора светофильтров производился по следующим формулам [3]:

$$X = k_c \int_0^{\infty} P_{\lambda}(\lambda) X(\lambda) d\lambda \quad Y = k_c \int_0^{\infty} P_{\lambda}(\lambda) Y(\lambda) d\lambda \quad Z = k_c \int_0^{\infty} P_{\lambda}(\lambda) Z(\lambda) d\lambda$$

где  $P_{\lambda}(\lambda)$  – спектральное распределение,  $X(\lambda)$ ,  $Y(\lambda)$ ,  $Z(\lambda)$  – кривые сложения цветов в  $\overline{XYZ}$  системе измерения цвета,  $k_c$  – множитель

$$k_c = \frac{100}{\int_0^{\infty} P_{\lambda}(\lambda) Y(\lambda) d\lambda}, \quad x = \frac{X}{X + Y + Z}, \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$



По спектрам, приведённым в паспорте получились следующие координаты: СС1 (0,22; 0,23), КС10 (0,68; 0,32), ЗС8 (0,34; 0,48), СЗС23 (0,27; 0,33), ПС8 (0,63; 0,30), ЖС19 (0,37; 0,39).

Оптический микроскоп Axio Imager Z.2 Vario выводит на своём экране диаграммы попиксельного распределения яркости красного, синего и зелёного цветов.

По горизонтальной оси диаграммы откладывается глубина цвета. Численные значения координат в системе *RGB* соответствуют максимумам распределения каждого их цветов.

Расчёт координат  $x$ ,  $y$  полученных экспериментально производился по следующим формулам [4]:

$$\begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0,4887 & 0,3107 & 0,2006 \\ 0,1762 & 0,8130 & 0,0108 \\ 0,0000 & 0,0102 & 0,9898 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} R \\ G \\ B \end{vmatrix}, \quad x = \frac{X}{X + Y + Z}, \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z}.$$

Экспериментальным путём получены следующие координаты стёкол: СС1 (0,24; 0,26), КС10 (0,69; 0,25), ЗС8 (0,32; 0,41), СЗС23 (0,24; 0,34), ПС8 (0,65; 0,23), ЖС19 (0,37; 0,38).

Координаты стёкол, рассчитанные по спектрам, приведённым в паспорте и координаты, рассчитанные экспериментально, были отмечены на диаграмме цветности. По диаграмме цветности определено, что все стёкла попали в области соответствующих цветов.

Погрешность в расхождении значений между координатами стёкол, рассчитанных по паспорту, и координатами стёкол, полученных экспериментальным путём, объясняется тем, что сами спектры стёкол, приведённые в паспорте набора светофильтров, могут иметь погрешность.

Благодаря такой методике удастся идентифицировать цвета на оптическом микроскопе без использования спектрометра.

#### *Список литературы*

1. Махов Д.С., Сагателян Г.Р., Самородов А.В. Цветовая мера для калибровки систем цифровой микроскопии // Измерительная техника. 2021. №10. С. 60-63.
2. Сагателян Г.Р., Самородов А.В., Кондратенко В.С., Пискунова Е.Р., Кузнецов А.С. Изготовление цветовой калибровочной меры для компьютеризованного гистологического анализа // Сборник научных трудов XII международной конференции по фотонике и информационной оптике. 2022. С. 66-67.
3. Годен Ж. Колориметрия при видеообработке. // М. Техносфера. 2008.
4. Горбунова Е.В., Чертов А.Н. Типовые расчёты по колориметрии источников излучения. Учебное пособие. 2014. С. 30-37.

С.В. МУТИЛИН, К.Е. КАПОГУЗОВ, Н.Д. МАНЦУРОВ,  
Л.В. ЯКОВКИНА<sup>1</sup>, В.Н. КИЧАЙ<sup>1</sup>, А.Е. ГАЙДУК<sup>1</sup>,  
Б.В. ВОЛОШИН, В.С. ТУМАШЕВ, В.А. СЕЛЕЗНЕВ

*Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск*

*<sup>1</sup>Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск*

## **НАНОКРИСТАЛЛЫ ДИОКСИДА ВАНАДИЯ С ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ ПОЛУПРОВОДНИК-МЕТАЛЛ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ**

Рассмотрены перспективы применения наноструктур диоксида ванадия ( $\text{VO}_2$ ) в качестве базовых элементов для перестраиваемой фотоники. Показано, что полученные структуры демонстрируют фазовый переход «полупроводник–металл» вблизи комнатной температуры со скачком сопротивления более трёх порядков. Установлено, что наноструктуры  $\text{VO}_2$  обладают высокой циклической стабильностью, что делает их перспективными для создания энергоэффективных и долговечных нанопереклюателей.

S.V. MUTILIN, K.E. KAPOGUZOV, N.D. MANTSUROV,  
L.V. YAKOVKINA<sup>1</sup>, V.N. KICHAJ<sup>1</sup>, A.E. GAYDUK,  
B.V. VOLOSHIN, V.S. TUMASHEV, V.A. SELEZNEV

*Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of SB RAS, Novosibirsk*

*<sup>1</sup>Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry of SB RAS, Novosibirsk*

## **VANADIUM DIOXIDE NANOCRYSTALS WITH A SEMICONDUCTOR-METAL PHASE TRANSITION FOR DYNAMIC OPTICAL CONTROL**

The potential for using vanadium dioxide ( $\text{VO}_2$ ) nanostructures as building blocks for tunable photonics is discussed. The resulting structures are shown to exhibit a semiconductor-to-metal phase transition near room temperature, with a resistance jump of more than three orders of magnitude. The high cyclic stability of  $\text{VO}_2$  nanostructures makes them a promising platform for energy-efficient nanoswitches with high duration.

В последние годы активно развивается направление, связанное с созданием микро- и наноструктур с перестраиваемыми свойствами для динамического управления электромагнитным излучением. Традиционные подходы используют жидкие кристаллы, термо- и электрооптические эффекты, а также микроэлектромеханические системы. Перспективной

альтернативой им являются материалы с фазовым переходом, позволяющие динамически управлять оптическими свойствами без движущихся частей [1]. Особый интерес представляет диоксид ванадия ( $\text{VO}_2$ ) – сильнокоррелированный материал, проявляющий сверхбыстрый ( $\sim 26$  фс) и обратимый фазовый переход «полупроводник–металл» вблизи комнатной температуры ( $68^\circ\text{C}$ ). Этот переход сопровождается резким изменением электронных и оптических характеристик: проводимость возрастает до 5 порядков, а изменение показателя преломления достигает  $\Delta n \sim 1$  на длине волны 1500 нм [2]. Благодаря таким свойствам  $\text{VO}_2$  перспективен для создания элементов оптических нейроморфных систем, перестраиваемых метаповерхностей и фотонных кристаллов. Практическое применение переключающих элементов на основе  $\text{VO}_2$  требует создания стабильных, воспроизводимых и долговечных устройств. Однако применение наиболее простых для синтеза и распространённых поликристаллических плёнок  $\text{VO}_2$  ограничено ввиду их недолговечности из-за возникающих механических напряжений ( $\sim 1\%$ ), возникающих при многократных фазовых переходах в плёнках. В отличие от плёнок, в нанокристаллах и наноструктурах деформации носят упругий характер, что позволяет им избежать механического разрушения и обеспечивает высокую циклическую стабильность.

В данной работе описываются методы формирования наноструктур и нанокристаллов  $\text{VO}_2$ , а также обсуждаются перспективы их применения в качестве энергоэффективных нанопереклюкателей для перестраиваемой фотоники. Методами химического осаждения из газовой фазы и атомно-слоевого осаждения на кремниевых подложках были сформированы наноструктуры  $\text{VO}_2$  и массивы одиночных нанокристаллов  $\text{VO}_2$ . В полученных структурах показано, что скачок сопротивления вследствие фазового перехода составляет более трёх порядков по величине и находится в интервале температур  $65 - 70^\circ\text{C}$ . Показано, что полученные структуры обладают высокой стабильностью и воспроизводимостью и могут выступать в качестве базовых элементов для перспективных направлений наноэлектроники и нанофотоники [3].

Исследование поддержано Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

#### *Список литературы*

1. Raoux S. Phase change materials // *Annu. Rev. Mater. Res.* 2009. V. 39. P. 25-48.
2. Ke Y., et al. Vanadium dioxide: The multistimuli responsive material and its applications // *Small*. 2018. V. 14 (39). P. 1802025.
3. Cueff, et al.,  $\text{VO}_2$  nanophotonics // *APL Photonics*. 2020. V. 5 (11). P. 110901.

Я.Д. ВАСИЛЮК, Е.А. МЕДВЕДЕВА, М.А. БАРАНОВ  
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

## **ФАЗОВАЯ ЗАДЕРЖКА СВЕТА В ТОНКИХ ПЛЁНКАХ АЛАНИНА, НАПЫЛЁННЫХ УЛЬТРАЗВУКОМ С РАЗНЫХ РАССТОЯНИЙ**

Приведены результаты эксперимента по измерению фазовой задержки света в тонких плёнках аланина, полученных методом ультразвукового напыления из раствора концентрации 1,3 г / 10 мл. Объяснено различие в значениях фазовой задержки для плёнок, напылённых с разных расстояний от распылителя до стеклянной подложки.

Ya.D. VASILYUK, E.A. MEDVEDEVA, M.A. BARANOV  
*Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University*

## **PHASE DELAY OF LIGHT IN THIN ALANINE FILMS DEPOSITED BY ULTRASONIC DEPOSITION FROM DIFFERENT DISTANCES**

Presents the result of an experiment measuring the phase delay of light in thin alanine films obtained by ultrasonic sputtering from a solution with a concentration of 1.3 g / 10 ml. The differences in phase delay values for films deposited at different distances from the sonotrode to the glass substrate are explained.

Метод ультразвукового напыления биомолекулярных плёнок предоставляет возможность создания уникальных молекулярных структур в форме замкнутого кольца. Создание таких тонких плёнок может быть полезно в области молекулярной электроники, в которой оптические и электрические характеристики молекул используют при создании новых или усовершенствовании существующих электронных устройств [1].

Целью работы является экспериментальное исследование фазовой задержки света, проходящего через образцы биомолекулярных плёнок, полученных из раствора аланина концентрации 1,3 г / 10 мл с помощью облучения раствора ультразвуком и последующего осаждения частиц на подложку. Мы использовали ультразвуковой гомогенизатор Bandelin SONOPULS HD 4050 с титановым зондом (рис. 1). В качестве источника света взяли широкополосный светодиод с монохроматическим фильтром, пропускающим длину волны 632,8 нм. Подробное описание конструкции измерительной установки, принципов её функционирования и

формализма, использующегося для описания поляризационных свойств биомолекулярных плёнок приведены в работах [2 - 4].

Провели измерения на плёнках, напылённых с расстояния 1, 1.5, 2 и 2,5 см. Зависимость значений рассчитанных фазовых задержек с СКО от расстояния напыления приведены на рис. 2. Из результатов видно, что плёнки, напылённые с расстояния более 1 см, проявляют схожие (с учётом СКО) фазозадерживающие свойства. Это связано с однородностью полученных плёнок: кольцевидные плёночные структуры диаметром до 100 мкм были распределены равномерно по поверхности подложки. На расстоянии 1 см раствор разбрызгивался таким образом, что капли раствора высыхали и образовывали сплошную плёнку, а не кольцевидные структуры. Увеличение фазовой задержки в такой плёнке связано с большим количеством молекул, которые свет встретил на пути распространения.



Рис. 1. Схема напыления плёнок

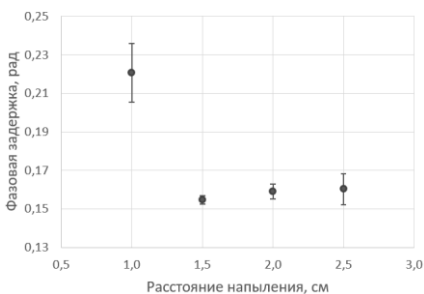


Рис. 2. Зависимость фазовой задержки от расстояния напыления

#### Список литературы

1. Величко Е.Н., Цыбин О.Ю. Гибридная биомолекулярная электроника: монография. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021.
2. Freudenthal J. Intuitive interpretation of Mueller matrices of transmission // Hinds Instruments, Inc. 2018.
3. Ignatenko D.N., Shkirin A.V., Lobachevsky Y.P., Gudkov S.V. Applications of Mueller matrix polarimetry to biological and agricultural diagnostics: A Review // Appl. Sci. 2022. V. 12. P. 5258.
4. Василюк Я.Д. Разработка оптической схемы для анализа поляризационных свойств биомолекулярных пленок: выпускная квалификационная работа бакалавра. СПб, 2024.

Д.Н. БУХАРОВ, Т.А. ХУДАЙБЕРГАНОВ

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

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИСКУССТВЕННОГО АЛАМАЗА В ПРИБЛИЖЕНИИ ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА С NV-ЦЕНТРАМИ**

Приведена модель диэлектрической проницаемости и поглощения для искусственного алмаза в рамках фотонного кристалла с NV-центрами с учётом действия лазерного излучения. Модель формировалась на основе уравнений Максвелла и решалась FDTD методом с PML-граничными условиями.

D.N. BUKHAROV, T.A. KHUDAIBERGANOV

*Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs*

## **ARTIFICIAL DIAMOND OPTIC PROPERTIES MODELING IN THE APPROXIMATION OF A PHOTONIC CRYSTAL WITH NV CENTERS**

A model of permittivity and absorption for synthetic diamond within a photonic crystal with NV centers is presented, taking into account the action of laser radiation. The model was developed based on Maxwell's equations and solved using the FDTD method with PML boundary conditions.

Лазерно-индуцированные структуры на основе искусственных алмазов находят широкое применение в задачах разработки инновационной элементной базы приборов современной фотоники и оптоэлектроники [1, 2]. Для таких структур определяющими являются оптические свойства алмазных структур, на которые происходит воздействие, которые удобно описывать с помощью математического/компьютерного моделирования.

Для описания оптоэлектрических свойств искусственного алмаза, лазерное воздействие на который позволяет синтезировать графитизированные структуры, применяемые в качестве чувствительных элементов для сенсоров, использовалась модель фотонного кристалла с NV-центрами [3]. Модель была сформирована системой уравнений Максвелла для ТЕ-моды. Диэлектрическая проницаемость в модели отражала геометрию структуры: алмазный субстрат, цилиндрические каверны и вклад от NV-центров. Метод конечных разностей во временной области (FDTD) дискретизировал уравнения Максвелла на сдвинутой сетке Yee, обновляя электрическое и магнитное поля чередующимся

образом во времени. Граничными условиями служили PML-слои по всем осям. Моделирование проводилось на Python, поля инициализировались нулевыми значениями, а возбуждение производилось – гауссовым лазерным источником. По предложенной модели были получены распределение интенсивности на поверхности (рис. 1), диэлектрической проницаемости (рис. 2) и поглощения (рис. 3) модельного искусственного алмаза.

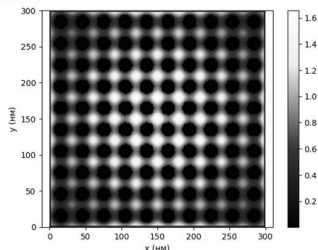


Рис. 1. Модельное распределение интенсивности

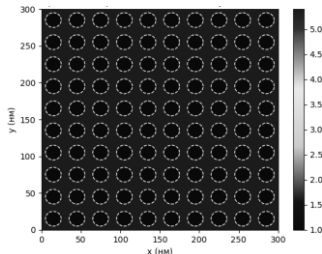


Рис. 2. Модельное распределение диэлектрической проницаемости

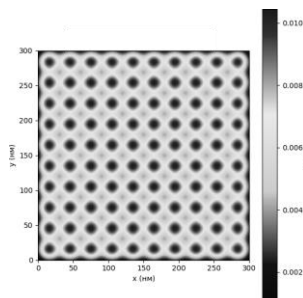


Рис. 3. Модельное распределение поглощения

Полученные результаты не противоречили литературным данным и показали применимость предложенного приближения для описания структуры реальных искусственных алмазов.

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FZUN-2024-0018.

#### *Список литературы*

1. Mi S., Kiss M., Graziosi T., et al. // Journal of Physics: Photonics. 2020. V. 2.
2. Ashikcalieva K.K. // Phys. Wave Phen. 2022. V. 30. P. 1-16.
3. Боголюбов А.Н. и др. // Журнал радиоэлектроники. 2006. Т. 5. С. 1-8.

И.А. ФЕДОРОВА, В.Ю. ЮРОВ, А.П. БОЛЬШАКОВ,  
М.Ю. ПОПОВ, С.Г. РЫЖКОВ, П.А. ПИВОВАРОВ,  
В.Г. РАЛЬЧЕНКО

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

## **ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ МОНОКРИСТАЛЛОВ АЛМАЗА В ПРОЦЕССЕ СИНТЕЗА В СВЧ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ**

Мы измерили спектры комбинационного рассеяния (КР) монокристалла алмаза во время эпитаксиального роста в СВЧ плазмохимическом реакторе при различных температурах подложки. По смещению пика первого порядка КР определяли температуру кристалла. Показано, что метод *in situ* КР обеспечивает более точное измерение температуры по сравнению с пирометрическим способом, что важно для контроля процесса синтеза CVD-алмаза.

I.A. FEDOROVA, V.Yu. YUROV, A.P. BOL'SHAKOV,  
M.Yu. POPOV, S.G. RYZHKOV, P.A. PIVOVAROV,  
V.G. RALCHENKO

*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*

## **USE OF RAMAN SPECTROSCOPY TO MONITOR THE TEMPERATURE OF DIAMOND SINGLE CRYSTALS DURING SYNTHESIS IN A MICROWAVE PLASMA CVD REACTOR**

We measured the Raman spectra of a diamond single crystal during epitaxial growth in a microwave plasma reactor at various substrate temperatures. The crystal temperature was determined from the shift of the first-order Raman peak. It was shown that *in situ* Raman scattering provides more accurate temperature measurements than pyrometric methods, which is important for monitoring the CVD diamond synthesis process.

Синтетический алмаз широко используется в электронике и квантовых технологиях [1, 2]. Для роста по технологии CVD- в СВЧ плазмохимических реакторах используют смеси водорода, метана и добавок. Контроль температуры подложки осуществляется по ИК-пирометру, однако его точность невысока из-за изменяющейся



эмиссионной способности растущего кристалла [3]. В качестве альтернативы применяют низко-когерентную интерферометрию и спектроскопию комбинационного рассеяния (КР), которая позволяет определять температуру по смещению положения узкого пика (около  $1332.5\text{ см}^{-1}$  при 298 К) [4] (рис. 1). В ходе экспериментов измеряли спектры КР, сравнивали их с данными пирометра и интерферометра, и подтвердили эффективность КР для бесконтактного контроля температуры. Эпитаксиальное осаждение проводили на алмазной подложке в реакторе Ardis-300 при параметрах: давление 60 Торр, расход газа 0,5 л/мин, мощность 2,7 кВт. Найдено, что пирометрические значения систематически на 70 - 90 °С ниже интерферометрических (близки к истинной температуре), а спектроскопия КР позволила более точно определить температуру, особенно при высоких температурах (рис. 2), и может быть рекомендована для контроля процесса синтеза алмаза в плазме.

Работа выполнена при поддержке РНФ, грант № 23-42-00120.

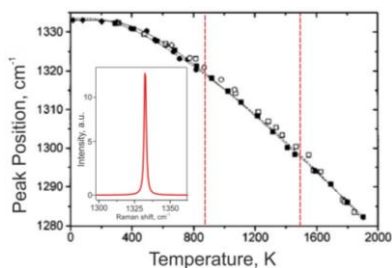


Рис. 1. Температурная зависимость положения линии КР (на вставке) для алмаза [4], область между пунктирными линиями (870 - 1050 °С) исследована в настоящей работе

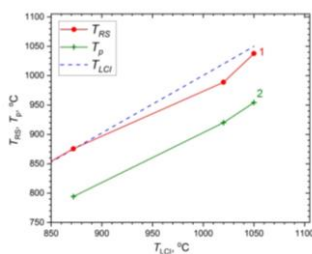


Рис. 2. Сравнение температур кристалла в плазме, измеренных с помощью КР (1), пирометра (2) и интерферометра  $T_{LCI}$  (пунктир)

#### Список литературы

1. Pashinin V.P., Ralchenko V.G., et al. // Laser Physics Letters. 2016. V. 13. P. 065001.
2. Kudryashov S.I., Danilov P.A., et al. // Diamond and Related Mater. 2025. V. 153. P. 112081.
3. Bolshakov A.P., Ralchenko V.G., et al. // Materials Today Comm. 2020. V. 25. P. 101635.
4. Cui J.B., Amtmann K., et al. // Journal of Applied Physics. 1998. V. 83. P. 7929.

М.Г. КУЧЕРЕНКО, А.П. РУСИНОВ

*Оренбургский государственный университет*

**ВЛИЯНИЕ ЗАРЯДА НАНОЧАСТИЦЫ  
НА КРОСС-АННИГИЛЯЦИЮ МОЛЕКУЛ СИНГЛЕТНОГО  
КИСЛОРОДА С ТРИПЛЕТНЫМИ ЦЕНТРАМИ  
В ЕЁ ПОЛИМЕРНОМ ОКРУЖЕНИИ**

Показано, что в композитной системе, состоящей из заряженной плазмонной наночастицы и адсорбированной на ней полиамфолитной полимерной цепи с локализованными на её звеньях электронно-возбуждёнными триплетными органическими молекулами кинетика кросс-аннигиляционной замедленной флуоресценции с участием молекул кислорода зависит от заряда наночастицы.

M.G. KUCHERENKO, A.P. RUSINOV

*Orenburg State University*

**INFLUENCE OF NANOPARTICLE CHARGE ON CROSS-  
ANNIHILATION OF SINGLET OXYGEN MOLECULES  
WITH TRIPLET CENTERS IN ITS POLYMER CROWN**

It is shown that in a composite system consisting of a charged plasmonic nanoparticle and a polyampholyte polymer chain adsorbed on it with electronically excited triplet organic molecules localized on its links, the kinetics of cross-annihilation delayed fluorescence with the participation of oxygen molecules depends on the charge of the nanoparticle.

Разработка перспективных функциональных комплексов, состоящих из структурно взаимосвязанных наноразмерных компонентов предполагает наличие физических механизмов управления процессами в подобных наносистемах. В работах [1, 2] показано, что одним из таких механизмов может выступать электростатическое взаимодействие заряженной наночастицы (НЧ) и полиамфолитной полимерной макромолекулы, когда электрический заряд наночастицы определяет пространственное распределение адсорбированных полимерных звеньев. В случае, когда звенья полимерной цепи выступают в качестве агрегатов для триплетных молекул сенситизатора и рассматриваемая система предполагается кислородопроницаемой, то кинетика кросс-аннигиляционной замедленной флуоресценции Т-центров становится чувствительной к заряду наночастицы.

Процесс кросс-аннигиляции молекулярных возбуждений сопровождается замедленной флуоресценцией (ЗФ) сенсibilизатора. При фотоактивации системы ультракоротким лазерным импульсом форма импульса  $I_{DF}^{T\Delta}(t)$  кросс-аннигиляционной замедленной флуоресценции определяется как интеграл по объёму области пространства, заполненному макроцепями, от произведения концентраций (сферическая симметрия)  $n_T(r,t)$  триплет-возбуждённых органических молекул,  $n_{\Delta}(r,t)$  синглетных возбуждений молекул  $O_2$  и радиационного фактора  $N(\omega|r)/\Gamma(\omega|r)$ , трансформированного плазмонным полем сферической НЧ.

$$I_{DF}^{T\Delta}(t|\omega) \sim K_{\Delta}(t) \int_R^{\infty} n_T(r,t) n_{\Delta}(r,t) N(\omega|r) / \Gamma(\omega|r) 4\pi r^2 dr. \quad (1)$$

Расчёты по формуле (1) показывают, что кинетика замедленной кросс-аннигиляционной флуоресценции Т-центров существенным образом зависит от заряда НЧ (посредством зависимости от начального распределения Т-центров). Так, с увеличением заряда НЧ возрастает амплитуда люминесцентного сигнала и сокращается его длительность (рис. 1), как на этапе нарастания, так и на стадии релаксации.

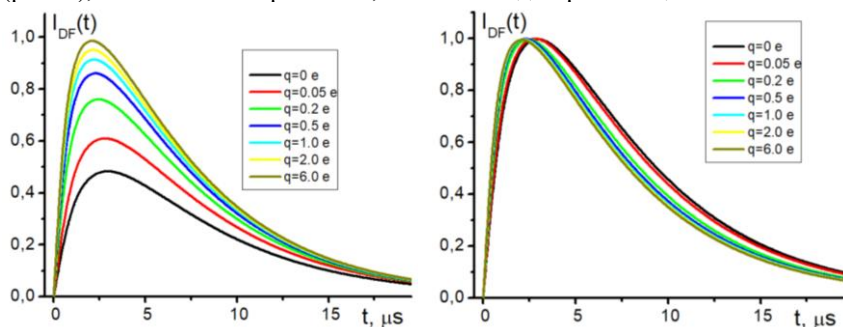


Рис. 1. Кинетика сигналов замедленной кросс-аннигиляционной флуоресценции Т-центров в опущенном полимерном слое при различном заряде наночастицы, графики справа нормированы на единицу

#### Список литературы

1. Кучеренко М.Г., Неясов П.П., Кручинин Н.Ю. // Хим. физ. 2023. Т. 42 (5). С. 1.
2. Кучеренко М.Г., Русинов А.П., Кручинин Н.Ю. // Опт. и спектр. 2024. Т. 132 (5). С. 566.

А.У. КАБДИЕВА, К.С. РОЖКОВА, А.Ж. МЕНДИБАЕВА,  
А.С. ЖУБАТ, Н.А. БЕКЖАН

*Карагандинский национальный исследовательский университет  
им. акад. Е.А. Букетова, Казахстан*

## **ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ MoS<sub>2</sub> НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКА И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРОВСКИТНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ PEDOT:PSS**

В данном исследовании изучается распределение тока в композитных плёнках PEDOT:PSS:MoS<sub>2</sub>. Результаты показывают, что наибольший ток протекает через наночастицы, встроенные в плёнку и контактирующие с проводящей подложкой, в то время как частицы, выступающие над поверхностью, вносят меньший вклад. Включение наночастиц уменьшает шероховатость поверхности PEDOT:PSS, что приводит к более равномерному росту кристаллов перовскита. Это улучшает перенос заряда, уменьшает рекомбинацию и повышает как эффективность, так и стабильность перовскитных солнечных элементов.

A.U. KABDIYEVA, X.S. ROZHKOVA, A.Zh. MENDIBAYEVA,  
A.S. ZHUBAT, N.A. BEKZHAN

*Karaganda National Research University named after acad. Ye.A. Buketov, Kazakhstan*

## **IMPACT OF MoS<sub>2</sub> NANOPARTICLES ON CURRENT DISTRIBUTION AND EFFICIENCY OF PEDOT:PSS-BASED PEROVSKITE SOLAR CELLS**

This study investigates the current distribution in PEDOT:PSS:MoS<sub>2</sub> composite films. The results show that the highest current flows through nanoparticles embedded in the film and in contact with the conductive substrate, while surface-protruding particles contribute less. Incorporating nanoparticles reduces the surface roughness of PEDOT:PSS, leading to more uniform perovskite crystal growth. This improves charge transport, reduces recombination, and enhances both the efficiency and stability of perovskite solar cells.

Изображения распределения тока, полученные с помощью контактного зонда на рис. 1, позволяют выделить области с различной проводимостью. Очевидно, что ток распределяется неравномерно: наибольшая проводимость наблюдается в отдельных областях, размер которых примерно соответствует размеру частиц [1]. При этом частицы, наиболее выступающие над поверхностью, практически не коррелируют с

областями наибольшего тока. Из этого можно сделать вывод, что наибольший ток через композитную плёнку протекает через частицы, встроенные в плёнку и, по-видимому, соприкасающиеся с проводящей подложкой. Если частица в плёнке не соприкасается с подложкой, ток будет меньше. Таким образом, можно сделать вывод, что при определённой концентрации наночастиц в PEDOT:PSS наночастицы будут располагаться преимущественно на поверхности, что должно влиять на подвижность заряда.

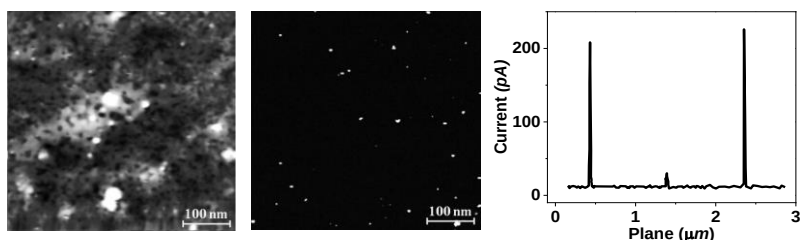


Рис. 1. Токковые характеристики PEDOT:PSS:MoS<sub>2</sub>

PEDOT:PSS является распространённым материалом для транспортировки дырок в PSC. Однако устройства на основе PEDOT:PSS демонстрируют потерю Voc и низкую эффективность, что объясняется несоответствием выравнивания энергетических уровней и плохим взаимодействием между PEDOT:PSS и перовскитным материалом [2]. Наши результаты показывают, что добавление наночастиц снижает шероховатость поверхности плёнки PEDOT:PSS. В результате плёнка становится более однородной, что способствует лучшему росту кристаллов перовскита, а также приводит к уменьшению рекомбинации зарядов и, как следствие, к повышению эффективности и стабильности PCS.

#### *Список литературы*

1. Kabdiyeva A., Zeinidenov A., Abeuov D., Rozhkova X., Aimukhanov A. Enhancing the efficiency and stability of perovskite solar cells by incorporating MoS<sub>2</sub> nanoparticles into the hole-transport layer // Optical Materials. 2025. V. 169. P. 117581.
2. Qi Y., Almtiri M., Giri H., Jha S., Ma G., Shaik A.K., Zhang Q., Pradhan N., Gu X., Hammer N.I., Patton D., Scott C., Dai Q., Evaluation of the Passivation Effects of PEDOT:PSS on Inverted Perovskite Solar Cells // Adv. Energy Mater. 2022. V. 12.

Г.А. ШУТКИН, М.Д. ПАВЛОВА, И.А. ЛАМКИН, С.А. ТАРАСОВ  
*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОРГАНИЧЕСКОЙ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ P3HT:EH-IDTBR**

Приведены результаты экспериментального исследования органической фоточувствительной структуры на основе полимерного донора (P3HT) и нефуллеренового акцептора EH-IDTBR. Показано, что благодаря комплементарным спектрам поглощения компонентов активного слоя структура обладает широким диапазоном фоточувствительности от 400 до 750 нм. Установлено, что пиковое значение фоточувствительности достигает 0,12 А/Вт на длине волны 710 нм.

G.A. SHUTKIN, M.D. PAVLOVA, I.A. LAMKIN, S.A. TARASOV  
*Saint Petersburg State Electrotechnical University «LETI»*

## **INVESTIGATION OF SPECTRAL CHARACTERISTICS OF AN ORGANIC PHOTOSENSITIVE STRUCTURE BASED ON A P3HT:EH-IDTBR**

Presents the results of an experimental study of an organic photosensitive structure based on the polymer donor (P3HT) and the non-fullerene acceptor EH-IDTBR. It is shown that due to the complementary absorption spectra of the active layer components, the structure has a broad photosensitivity range from 400 to 750 nm. It was found that the peak photosensitivity reaches 0.12 A/W at a wavelength of 710 nm.

Органические фоточувствительные структуры (ОФС) представляют большой интерес для создания оптоэлектронных устройств, таких как фотодетекторы и солнечные элементы, благодаря низкой стоимости производства, механической гибкости и возможности нанесения на большие площади из раствора. Ключевым фактором, определяющим эффективность таких устройств, является правильный подбор донорного и акцепторного материалов, формирующих активный слой с объёмным гетеропереходом. Использование нефуллереновых акцепторов (НФА) является одним из перспективных направлений для повышения эффективности ОФС.

Целью данной работы являлось изготовление и экспериментальное исследование спектральных характеристик ОФС на основе полимерного донора поли(3-гексилтиофен) (РЗНТ) и НФА (2-((5Z,5'Z)-5,5'-((6,6,12,12-Тетраоктил-6,12-дигидродииндено[1,2-b:1,2-е]тиено[3,2-b]тиофен-2,8-диил) бис(метанилиден)) бис(3-этил-2-тиоксотиазолидин-4-он)) (ЕН-IDTBR).

Активный слой с объёмным гетеропереходом на основе смеси РЗНТ:ЕН-IDTBR формировался методом центрифугирования из раствора на основе хлорбензола на подложке из стекла с прозрачным проводящим слоем оксида олова легированного фтором (FTO), который выступал в качестве анода. В качестве верхнего катода использовался эвтектический сплав на основе индия, галлия и олова (InGaSn).

На рис. 1 приведены спектры поглощения плёнок РЗНТ, ЕН-IDTBR и их смеси. Спектр поглощения РЗНТ имеет максимум в области 450 - 600 нм, ЕН-IDTBR поглощает в длинноволновой области с максимумом в диапазоне 600 - 700 нм. Плёнка РЗНТ:ЕН-IDTBR демонстрирует широкий спектр поглощения, охватывающий практически всю видимую область (400 - 750 нм).

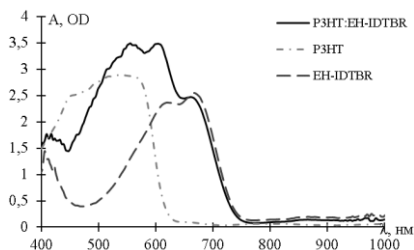


Рис. 1. Спектры поглощения РЗНТ, ЕН-IDTBR и их смеси

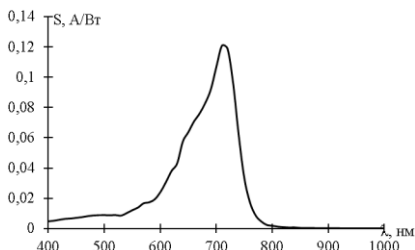


Рис. 2. Спектр fotocувствительности FTO/РЗНТ:ЕН-IDTBR/InGaSn

Спектр fotocувствительности представлен на рис. 2. Устройство демонстрирует высокую эффективность в диапазоне 550 - 750 нм. Максимальное значение fotocувствительности составило 0,12 A/Вт на 710 нм, что объясняется не только широким спектром поглощения, но и взаимовыгодным расположением верхних занятых молекулярных орбиталей (HOMO) и нижних свободных молекулярных орбиталей (LUMO) донора и акцептора. Это обеспечивает эффективную диссоциацию экситонов на границе раздела материалов и безбарьерный перенос носителей заряда к электродам.

Исследование проводилось в рамках проекта № FSEE-2025-0013.

А.К. МУСАБЕКОВА, А.К. АЙМУХАНОВ, А. РУСТЕМОВА,  
М. РАШИДКЫЗЫ, Д.К. БАКИЕВ, К.К. МУРАТОВА

*Карагандинский национальный исследовательский университет  
им. акад. Е.А. Букетова, Казахстан*

## **ВЛИЯНИЕ РАЗНЫХ СПИРТОВЫХ РАСТВОРИТЕЛЕЙ НА МОРФОЛОГИЮ И СТРУКТУРУ ПЛЁНОК $\text{SnO}_2$**

В данной работе золь-гель методом были получены плёнки оксида олова ( $\text{SnO}_2$ ) в разных спиртовых растворителях. Исследовалось влияние разных спиртовых растворителей на морфологию и структуру оксида олова. Формирование физической поверхности плёнок  $\text{SnO}_2$  при синтезе будет определять поверхностный интерфейс.

A.K. MUSSABEKOVA, A.K. AIMUKHANOV, A. RUSTEMOVA,  
M. RASHIDKYZY, D.K. BAKIYEV, K.K. MURATOVA

*Karaganda National Research University named after acad. Ye.A. Buketov, Kazakhstan*

## **INFLUENCE OF DIFFERENT ALCOHOL SOLVENTS ON THE MORPHOLOGY AND STRUCTURE OF $\text{SnO}_2$ FILMS**

In this work, tin oxide ( $\text{SnO}_2$ ) films were obtained by the sol-gel method using different alcohol solvents. The influence of various alcohol solvents on the morphology and structure of tin oxide was investigated. The formation of the physical surface of the  $\text{SnO}_2$  films during synthesis will determine the surface interface.

Подготовка подложек FTO осуществлялось согласно методике подробно описанной в работе [1]. Для получения плёнок  $\text{SnO}_2$  50 мг  $\text{SnCl}_3$  (чистота 99,9 % Sigma Aldrich) растворяли раздельно в объёме 0.5 мл в этиловом, бутиловом и изопропиловом спиртах (чистота 99,9 % Sigma Aldrich), после полученные растворы постоянно перемешивали при 80 °C в течение трёх часов, а затем выдерживали 24 ч. при комнатной температуре. Такая процедура проводилась для всех трёх спиртовых растворителей. Далее полученный раствор наносили на поверхность FTO подложек методом центрифугирования (SPIN150i, Semiconductor Production System) при скорости вращения 4000 об/мин. Время вращения центрифуги 30 секунд. После полученные плёнки отжигали на атмосфере воздуха при температуре 500 °C в течение часа.

На рис. 1 показаны СЭМ-снимки морфологии плёнок  $\text{SnO}_2$ , полученные из прекурсоров разных растворителей и отожжённых в



атмосфере воздуха при температуре 500 °С. Из рисунков видно, что морфологии поверхностей плёнок различаются в зависимости от типа используемого спирта для приготовления плёнок.

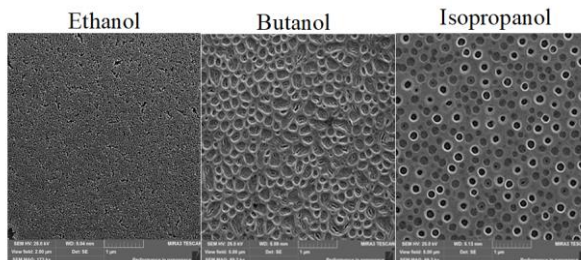


Рис. 1. СЭМ-снимки морфологии плёнок  $\text{SnO}_2$ , полученных из разных спиртовых растворителей

Поскольку мы имеем дело с плёнками, полученными spin-coating из разных спиртовых растворителей, то во всех образцах наблюдается изменение морфологии [2]. Причина в разной морфологии плёнок в том, что используемые спирты имеют разные температуры кипения. Так как бутанол имеет высокую температуру кипения 117.3 °С, то он снижает поверхностное натяжение формируемой плёнки при центрифугировании. В этом случае при постепенном возрастании температуры отжига плёнки процесс испарения растворителя протекает медленно. В результате в поверхностном слое замедляется процесс испарения растворителя. Тогда по мере повышения температуры отжига на поверхностной области образуются участки с пузырями, которые в итоге лопаются и оставляют неглубокие микроотверстия. Температура кипения изопропанола составляет 82 °С, из-за низкой температуры кипения раствор не успевает равномерно распределиться по поверхности, из-за быстрого испарения на поверхности формируются области, где образуются пузыри, которые в итоге лопаются, оставляя за собой пинхолы. Температура кипения этанола составляет 78 °С, поэтому в результате быстрого испарения растворителя градиенты поверхностного натяжения приводят к растрескиванию плёнки что и наблюдается при формировании плёнки в этаноле.

#### *Список литературы*

1. Chen P., Yin X., Low temperature solution processed indium oxide thin films with reliable photoelectrochemical stability for efficient and stable planar perovskite solar cells // J. Mater. Chem. A. 2017. V. 5 (20). P. 9641-9648.
2. Marikkannan M., Vishnukanthan V., Vijayshankar A., Mayandi J., Pearce J.M.. A novel synthesis of tin oxide thin films by the sol-gel process for optoelectronic applications // AIP Advances. 2015. V. 5. P. 027122.

В.М. НАЛБАНДЯН, М.Г. КУЧЕРЕНКО

*Оренбургский государственный университет*

## ГЕНЕРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ «МОЛЕКУЛА – МЕТАЛЛИЧЕСКАЯ НАНОЧАСТИЦА СО СЛОЕМ ИЗ J-АГРЕГАТОВ»

Построена математическая модель влияния магнитного поля на генерационные характеристики молекул, расположенных вблизи слоистых плазмонных наночастиц с оболочкой из J-агрегатов. Расчёты показали, что пороговые значения генерации композитных молекулярных систем являются магнитозависимыми величинами. Установлена высокая чувствительность магнитного эффекта к варьированию частотных параметров гибридной плазмон-экситонной системы.

V.M. NALBANDYAN, M.G. KUCHERENKO

*Orenburg State University*

## GENERATION CHARACTERISTICS OF A MOLECULE–METALLIC NANOPARTICLE SYSTEM WITH A LAYER OF J-AGGREGATES

A mathematical model of the effect of a magnetic field on the generation characteristics of molecules located near layered plasmonic nanoparticles with a shell of J-aggregates is constructed. Calculations have shown that the generation thresholds of composite molecular systems are magnetically dependent values. A high sensitivity of the magnetic effect to variation of the frequency parameters of the hybrid plasmon-exciton system has been established.

Использование однородных и слоистых наночастиц (НЧ) для улучшения генерационных параметров лазеров на красителях вызывает значительный интерес, что обуславливает их широкое применение [1, 2].

В данной работе рассмотрена слоистая НЧ, тензор  $\vec{\alpha}$  дипольной электрической поляризуемости которой определяется выражением [3]

$$\vec{\alpha}(\varepsilon_1(\omega|\mathbf{B}), \varepsilon_2(\omega), \varepsilon_3) = \left[ (\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2)(\varepsilon_2 - \varepsilon_3) + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)(2\varepsilon_2 + \varepsilon_3)\xi^3 \right] \times \\ \times \left[ (\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2)(\varepsilon_2 + 2\varepsilon_3) + 2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)(\varepsilon_2 - \varepsilon_3)\xi^3 \right]^{-1} R_2^3,$$

где  $R_1$ ,  $R_2$  – радиусы ядра НЧ и оболочки соответственно,  $\xi = R_1/R_2$ ,  $\varepsilon_1(\omega|\mathbf{B})$  – тензор диэлектрической проницаемости замагниченного

металлического ядра,  $\varepsilon_2(\omega)$  – диэлектрическая проницаемость экситонного слоя,  $\varepsilon_3$  – скалярная диэлектрическая проницаемость окружающей среды.

Для порогового значения интенсивности излучения накачки  $I_{th}$ , мощности накачки  $W_{th}$  и инверсии  $n_{th}$  получены выражения [4] с характерной зависимостью пороговых значений от индукции магнитного поля **B**.

$$I_{th} = \hbar\omega \frac{(n_0 + n_{th})}{(n_0 - n_{th})} \frac{[w_{sp}(\mathbf{r}|\mathbf{B}) + U(\mathbf{r}|\mathbf{B})]}{\sigma(\mathbf{B})}, W_{th} = \frac{n_0 + n_{th}}{n_0 - n_{th}} \frac{1}{T_1}, n_{th} = 2\kappa / (bV_a).$$

Установлено, что пороговые значения накачки  $W_{th}$  и инверсии населённости  $n_{th}$  демонстрируют различную зависимость от магнитного поля (рис. 1). Дополнительным регулирующим фактором, влияющим на пороговые значения генерации, является частота  $\omega_{exc}$ . Подбирая определённые значения этой частоты, можно как увеличить, так и уменьшить пороговые величины  $W_{th}$ ,  $n_{th}$ .

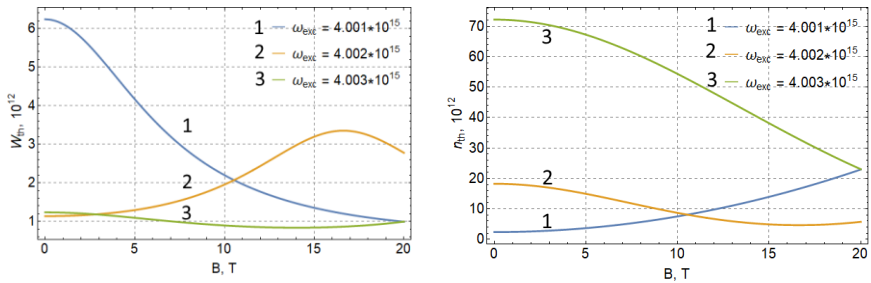


Рис. 1. Зависимость пороговых значений генерации лазера на красителе от величины индукции магнитного поля для различных частот  $\omega_{exc}$  перехода, соответствующих центру полосы излучения для J-агрегата.  $R_1 = 10$ ,  $R_2 = 20$ ,  $r_0 = 23$  нм,  $\omega_p = 13.87 \cdot 10^{15}$ ,  $\omega_0 = 6.6 \cdot 10^{15}$ ,  $\omega = 6.6628 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ ,  $\varepsilon_3 = 1.5$

Финансирование работы: грант Госзадания (проект № FSGU-2023-0003), грант на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технического развития 075-15-2024-550.

#### Список литературы

1. Зейниденов А.К. и др. // Вестник ОГУ. 2014. № 9 (170). С. 96-102.
2. Кучеренко М.Г. и др. // XIV Межд. конф. по фотонике и информ. оптике. Москва: НИЯУ МИФИ, 2025. С. 291-292.
3. Кучеренко М.Г., Налбандян В.М. // Оптический журнал. 2018. Т. 85. № 9. С. 3-11.
4. Кучеренко М.Г. и др. // Хим. физика молекул и полифункционал. материалов: сб. матер. междунар. науч. конф. Оренбург: ОГУ, 2024. С. 110-115.

А.А. АЙМАГАМБЕТОВА, Н.Х. ИБРАЕВ

*Карагандинский национальный исследовательский университет  
им. акад. Е.А. Букетова, Казахстан*

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПЛАЗМОННОГО УСИЛЕНИЯ КСАНТЕНОВЫХ КРАСИТЕЛЕЙ НАНОЧАСТИЦАМИ СЕРЕБРА И ЗОЛОТА**

В работе исследуется влияние замещения тяжёлых атомов и плазмонных наноструктур на люминесценцию ксантеновых красителей в полимерных плёнках. Показано, что галогенирование усиливает интеркомбинационную конверсию и повышает вклад триплетных состояний, приводя к росту замедленной флуоресценции и фосфоресценции. Островковые плёнки серебра и золота по-разному воздействуют на излучательные процессы: серебряные наночастицы обеспечивают более сильное плазмонное усиление, тогда как золотые дают умеренное увеличение интенсивности, но обладают лучшей химической стабильностью.

A.A. AYMAGAMBETOVA, N.K. IBRAYEV

*Karaganda National Research University named after acad. Ye.A. Buketov, Kazakhstan*

## **COMPARATIVE ANALYSIS OF PLASMONIC ENHANCEMENT OF XANTHENE DYES BY SILVER AND GOLD NANOPARTICLES**

This work investigates the influence of heavy-atom substitution and plasmonic nanostructures on the luminescence of xanthene dyes embedded in polymer films. It is shown that halogenation enhances intersystem crossing and increases the population of triplet states, leading to stronger delayed fluorescence and phosphorescence. Island films of silver and gold affect the radiative processes differently: silver nanoparticles provide stronger plasmonic enhancement, while gold nanoparticles yield moderate intensity growth, but offer superior chemical stability.

Изучение фосфоресценции и замедленной флуоресценции органических красителей приобретает всё большую актуальность благодаря применению в оптоэлектронике, биомедицине и сенсорах. Если замещение тяжёлых атомов усиливает заселение триплетных состояний, то плазмонные наночастицы увеличивают люминесценцию за счёт локализованного поверхностного плазмонного резонанса (ЛППР) [1].

В данной работе исследованы спектральные и кинетические свойства флуоресцеина и его галогенированных производных в плёнках ПВС с

островковыми структурами Ag и Au и сопоставлены с литературой. Галогенирование усиливает триплетную эмиссию благодаря росту спин-орбитального взаимодействия, тогда как плазмонные наночастицы дополнительно увеличивают интенсивность излучения. Ag даёт более сильное усиление из-за острого резонанса и меньшего затухания, в то время как Au выгодно отличается химической стабильностью и биосовместимостью. В наших плёнках с Au наблюдалось умеренное усиление задержанной флуоресценции и фосфоресценции, особенно для эозина, где фосфоресценция возрастала более чем вдвое [2, 3].

В исследовании использованы флуоресцеин, дибромфлуоресцеин, эритрозин и эозин, включённые в ПВС ( $5 \times 10^{-4}$  моль/л). Островковые плёнки Ag и Au получали химическим осаждением. Спектры поглощения лежали в диапазоне 400 - 600 нм, флуоресценции – 500 - 650 нм; галогенирование вызывало батохромный сдвиг. Время жизни флуоресценции уменьшалось при введении тяжёлых атомов, тогда как интенсивности замедленной флуоресценции и фосфоресценции увеличивались. AgNP усиливали фосфоресценцию в 4 - 6 раз, что значительно превышает усиления AuNP. Для AuNP усиление составляло 1,07 - 2,19 раз и сопровождалось сокращением времени жизни, что указывает на ускорение радиационного распада [3].

В отличие от золота, серебро не трансформирует возбуждение преимущественно в тепло, а способствует рассеянию излучения. Таким образом, серебро является превосходным плазмонным партнером для галогенированных ксантеновых красителей. В производных флуоресцеина, где ISC уже усилен тяжёлыми атомами, синергия с серебряными наночастицами приводит к высокоэффективной фосфоресценции, что имеет решающее значение для практических приложений.

#### *Список литературы*

1. Baryshnikov G., Minaev B., Ågren H. Theory and calculation of the phosphorescence phenomena in organic molecules // Chem. Rev. 2017. V. 117. P. 6500.
2. Ibrayev N.A., Seliverstova E.V., Valiev R.R., Aymagambetova A.A., Sundholm D. The effect of heavy atoms on the deactivation of electronic excited states of dye molecules near the surface of metal nanoparticles // Phys. Chem. Chem. Phys. 2024. V. 26. P. 25986.
3. Влияние плазмонных наночастиц золота на спектрально-люминесцентные свойства галоген-замещенных производных флуоресцеина // Современные проблемы физики: материалы IX международной научной конференции. Душанбе, 2024. С. 114-118.

Н.Д. ЯКУШОВА, М.Г. СИТНИКОВА, А.А. КАРМАНОВ

*Пензенский государственный университет*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИХ ПЛЁНОК ZnO:Fe:Bi,  
СЕНСИБИЛИЗИРОВАННЫХ КРАСИТЕЛЕМ**

Приведены результаты исследования спектров пропускания тонких плёнок оксида цинка, одновременно допированных железом и висмутом в концентрации 3 ат. %, подвергнутых воздействию жёсткого УФ-излучения в растворе метилового оранжевого в процессе фотокатализа. Проведена оценка вклада допантов и фотосенсибилизации на оптическую ширину запрещённой зоны материала.

N.D. YAKUSHOVA, M.G. SITNIKOVA, A.A. KARMANOV

*Penza State University*

**INVESTIGATION OF THE OPTICAL PROPERTIES  
OF DYE-SENSITIZED ZnO:Fe:Bi PHOTOCATALYTIC FILMS**

The paper presents the results of an investigation into the transmission spectra of zinc oxide-based thin films co-doped with Fe and Bi (3 at. %) and subjected to ultraviolet irradiation in a methyl orange solution during photocatalysis. The contribution of dopants and photosensitization to the optical band gap of the material was assessed.

На данный момент разработано множество подходов по управлению зонной структурой и оптическими свойствами плёнок на основе широкозонных оксидов, включая формирование гетероструктур [1], допирование [2] и содопирование [3].

Целью работы является исследование влияния допирования (Fe и Bi) золь-гель плёнок ZnO и сенсибилизации красителем (метилловым оранжевым) при облучении жёстким УФ-излучением на оптические свойства и ширину запрещённой зоны.

Тонкие плёнки ZnO:Fe:Bi были получены методом золь-гель технологии и сформированы на поверхности стеклянных подложек методом центрифугирования, отжиг был проведён в муфельной печи в воздушной атмосфере при температуре 550 °С в течение 30 мин. Сенсибилизация плёнок красителем проводилась при исследовании их фотокаталитических свойств. Плёнки помещались в водный раствор метилового оранжевого с концентрацией 40 мкмоль/л и облучались УФ-

лампой в течение двух часов. На рис. 1 приведены оптические спектры пропускания полученных плёнок до и после сенсibilизации красителем.

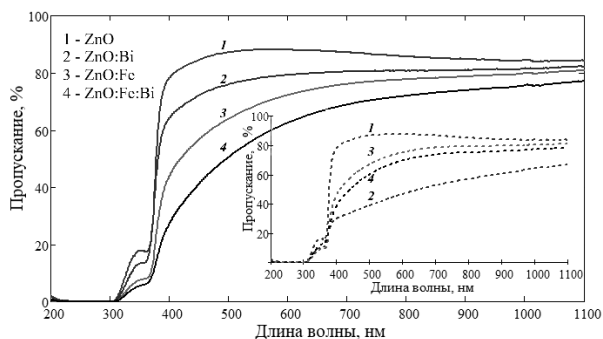


Рис. 1. Оптические спектры пропускания фотокаталитических плёнок ZnO:Fe:Bi до и после сенсibilизации красителем (метиловым оранжевым)

Допирование оксида цинка преимущественно приводит к уменьшению пропускания плёнок, наименьшее значение наблюдается для ZnO:Fe:Bi. С использованием метода Тауца [4] была рассчитана оптическая ширина запрещённой зоны  $E_g$ . Для немодифицированного ZnO она составила 3.28 эВ, допирование привело к её сокращению и для ZnO:Fe:Bi  $E_g = 3.16$  эВ. Для этих материалов сенсibilизация красителем при воздействии жёсткого УФ-излучения не способствовала изменению ширины запрещённой зоны. Однако, для ZnO:Fe наблюдается небольшой рост  $E_g$  после сенсibilизации 3.25 эВ. Для ZnO:Bi  $E_g = 3.28$ , после сенсibilизации 3.21 эВ.

Таким образом, показана возможность эффективного управления оптическими свойствами и шириной запрещённой зоны фотокаталитических плёнок ZnO:Fe:Bi за счёт комбинации нескольких подходов: допирования и содопирования, а также сенсibilизации метиловым оранжевым при одновременном облучении УФ-излучением.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 25-79-00338.

#### Список литературы

1. Chitra M., et al. // *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2020. V. 119. P. 113969.
2. Arshad M., et al. // *Journal of Luminescence*. 2015. V. 161. P. 275-280.
3. Yakushova N.D., et al. // *Technologies*. 2025. V. 13 (7). P. 277.
4. Viezbicke B.D., et al. // *Physica status solidi (b)*. 2015. V. 252 (8). P. 1700-1710.

А.З. ЗИЯТ, М.К. БЕЙСЕМБЕКОВ, А.К. ЗЕЙНИДЕНОВ,  
Б. СЫДЫХ, А. РАХИМ

*Карагандинский национальный исследовательский университет  
им. акад. Е.А. Букетова, Казахстан*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БИСЛОЙНЫХ ПЛЁНОК $\text{NiO}_x$ /ФТАЛОЦИАНИНА**

В данной работе показано, что бислойный дырочно-транспортный слой (HTLs) на основе фталоцианина и его металлокомплексов (MPc) и оксида никеля ( $\text{NiO}_x$ ) являются перспективным HTLs для инвертированных перовскитных солнечных элементов (PSCs). Плёнки  $\text{NiO}_x$  были получены методом spin-coating из золь-гель раствора. Измерены спектры поглощения бислойных HTLs плёнок. Установлено, уширение полос в Q- и В-диапазонах. Из спектров поглощения были рассчитаны степени беспорядка в исследуемых плёнках, который характеризуется энергией Урбаха.

A.Z. ZIYAT, M.K. BEISEMBEKOV, A.K. ZEINIDENOV,  
B. SYDYH, A. RAKHIM

*Karaganda National Research University named after acad. Ye.A. Buketov, Kazakhstan*

## **RESEARCH OF THE OPTICAL PROPERTIES OF $\text{NiO}_x$ /PHTHALOCYANINE BILAYER FILMS**

This study demonstrates that bilayer hole transport layers (HTLs) based on phthalocyanine and its metal complexes (MPc) and nickel oxide ( $\text{NiO}_x$ ) are promising HTLs for inverted perovskite solar cells (PSCs).  $\text{NiO}_x$  films were obtained by spin-coating from a sol-gel solution. The absorption spectra of the bilayer HTL films were measured. From the absorption spectra, the degree of disorder in the studied films, characterized by the Urbach energy, was calculated.

В исследовании спектров поглощения  $\text{NiO}_x$  и бислойных плёнок  $\text{NiO}_x$ /MPc, получено, что плёнки  $\text{NiO}_x$  хорошо поглощают в коротковолновой области спектра видимого диапазона. Наблюдаемое поглощение в плёнках  $\text{NiO}_x$  обусловлено переходами электронов из валентной зоны в уширенные состояния зоны проводимости, которые возникают из-за нестехиометрии, дефектов и неоднородностей материала. Это приводит к плавному краю поглощения и появлению дополнительных оптических переходов в видимой и УФ-областях спектра.



Для бислойных плёнок  $\text{NiO}_x/\text{MPc}$  наблюдаются интенсивные полосы в области  $\lambda = 351$  нм, относящиеся к В-диапазону и в области 622 - 688 нм, относящиеся к Q-диапазону. Из спектров получены значения полосы поглощения (FWHM) для  $\text{NiO}_x$  и бислойных плёнок  $\text{NiO}_x/\text{MPc}$  (рис. 1). Для металлофталацианинов наблюдается уширение FWHM в Q-диапазоне с 328.5 до 417.4 нм. Уширение FWHM в бислойных плёнках связано с содержанием центрального атома в фталоцианине, которое влияет на электронную структуру, что приводит к изменению ширины полос. Полученные данные показали, что оптическая ширина запрещённой зоны ( $E_g$ ) плёнки  $\text{NiO}_x$  составила  $E_g = 3,30$  эВ. Спектры поглощения использовались для расчёта степени беспорядка в исследуемых плёнках, которая характеризуется энергией Урбаха вблизи границы поглощения (рис. 2) и представляет собой ширину хвоста локализованных состояний в запрещённой зоне [1].

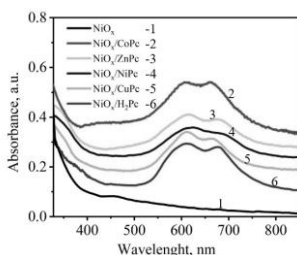


Рис. 1. Спектры поглощения

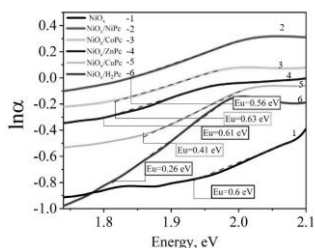


Рис. 2. Диаграмма Урбаха плёнок

Исследования показали, что уширение полосы поглощения и энергия Урбаха бислойных плёнок  $\text{NiO}_x/\text{MPc}$  связаны с содержанием центрального атома в фталоцианинах.

#### Список литературы

1. Beisembekov M.K., Tazhibayev S.K., Ziyat A.Z., Aimukhanov A.K., Omarbekova G.I., Oshanov Y.Z., Kassymov S.S., Zeinidenov A.K. Nickel oxide/phthalocyanine bilayer films for hole transport in efficient inverted perovskite solar cells // Materials Letters. 2026. V. 404. P. 139646.

С.В. АВЕРИН, В.А. ЛУЗАНОВ, В.А. ЖИТОВ,  
Л.Ю. ЗАХАРОВ, В.М. КОТОВ

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

## **ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОМЕТРОВЫХ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЁНОК ОКСИДА НИКЕЛЯ**

Нанометровые плёнки оксида никеля изготовлены на  $\text{LiNbO}_3$  подложках методом магнетронного распыления. Исследованы оптические свойства плёнок NiO в диапазоне длин волн 250...800 нм и выполнено моделирование спектров пропускания и отражения таких структур. Получена дисперсия комплексного показателя преломления выращенных плёнок, которая обеспечивает хорошее совпадение расчётных и экспериментальных кривых пропускания и отражения. Эти исследования и расчёты позволили определить толщины выращенных эпитаксиальных плёнок оптическими методами и сравнить их с результатами, полученными исходя из скорости роста плёнок и методами атомно-силовой микроскопии. Характеристики плёнок демонстрируют возможность создания на их основе эффективных детекторов УФ-части спектра.

S.V. AVERIN, V.A. LUZANOV, V.A. ZHITOV,  
L.Yu. ZAKHAROV, V.M. KOTOV

*Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS*

## **OPTICAL PROPERTIES OF NANOMETER EPITAXIAL NICKEL OXIDE FILMS**

Nanometer epitaxial nickel oxide films have been successfully fabricated on  $\text{LiNbO}_3$  substrates by magnetron sputtering. Optical properties of NiO films were studied in the wavelength range of 250 - 800 nm and the transmission and reflection spectra of these structures were simulated. The dispersion of the complex refractive index of the grown films was obtained, ensuring good agreement between the calculated and experimental transmission and reflection curves. These studies and calculations allowed us to determine the thickness of the grown epitaxial films using optical methods and compare them with results obtained from the film growth rate and atomic force microscopy data. The characteristics of the films demonstrate the possibility of creating UV- detectors.

Для осаждения плёнок оксида никеля на подложки  $\text{LiNbO}_3$  использовалась модифицированная вакуумная установка катодного распыления A550 VZK (Leybold Heraeus GmbH). Детали процесса осаждения плёнок NiO подробно представлены в работе [1]. Оптические

свойства изготовленных структур исследовались в диапазоне длин волн 250...800 нм. Для регистрации спектров изучаемых образцов использовался спектрофотометр SPECORD UV VIS. Было установлено, что пропускание плёнок NiO в диапазоне длин волн 450...800 нм составляет 60 %, а край оптического поглощения находится на 340 нм. Наблюдались колебания в спектрах пропускания /отражения исследуемых образцов, связанные с интерференцией света в слоистых структурах NiO / LiNbO<sub>3</sub>. Моделирование спектров пропускания с использованием метода  $2 \times 2$  матриц [2] подтвердило наблюдаемые особенности в спектрах и позволило определить дисперсию показателя преломления выращенных плёнок NiO. В качестве стартовых значений при моделировании были использованы толщины плёнок на основе оценки по времени роста. Мы варьировали дисперсию действительной части показателя преломления слоя NiO и его толщину, добиваясь максимального соответствия положения интерференционных особенностей на экспериментальных и расчётных кривых. При этом введение в показатель преломления мнимой части  $k$  (коэффициент экстинкции), позволило согласовать расчётные уровни пропускания с экспериментальными значениями. В области сильного поглощения наблюдается резкий рост как показателя преломления, так и коэффициента экстинкции. В области оптической прозрачности поглощение в NiO мало ( $k \sim 0.014$ ) и как  $n$ , так и  $k$  экспоненциально спадают, что соответствует нормальной дисперсии. Величины  $n$  и  $k$  для исследуемой плёнки NiO соответственно равны 2.44 и 0.13 на длине волны 350 нм и находятся в хорошем соответствии с данными работы [3] для NiO плёнок, напылённых на кварцевых стёклах и полимерных материалах. Коэффициенты поглощения в наших плёнках NiO экспоненциально растут с уменьшением длины волны оптического воздействия, достигая максимума  $\alpha = 2 \times 10^5 \text{ см}^{-1}$  на длине волны 340 нм.

Исследование спектров пропускания гетероструктур NiO / LiNbO<sub>3</sub> позволило определить толщины выращенных плёнок без разрушения структуры поверхности NiO. Результаты измерений толщин плёнок находятся в хорошем соответствии с данными, полученными методом AFM и исходя из скорости роста плёнок.

Работа выполнена в рамках Госзадания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

*Список литературы*

1. Аверин С.В., Лузанов В.А., Житов В.А. и др. // РЭ. 2024. Т. 69. № 9. С. 918.
2. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир. 1981.
3. Manjunatha K.N., Paul Sh. // Applied Surface Science. 2015. V. 352. P. 10-15.

М.И. ПАУКОВ<sup>1</sup>, Д.И. ЯКУБОВСКИЙ<sup>1</sup>, А.С. МАРАКУЛИН<sup>1</sup>,  
Ш. САН<sup>2</sup>, Я. ЖАНГ<sup>2</sup>, М.Г. БУРДАНОВА<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

<sup>2</sup>Столичный педагогический университет, Пекин

<sup>3</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

## **ЗАВИСИМОСТЬ ГЛУБИНЫ МОДУЛЯЦИИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ЕЁ СКОРОСТИ ОТ ТОЛЩИНЫ ДЛЯ УЛЬТРАТОНКИХ СПЛОШНЫХ ПЛЁНОК ЗОЛОТА**

Представлены результаты экспериментов с оптической накачкой – терагерцовым зондом ультратонких гладких золотых плёнок различной толщины (2–8 нм). В частности, были определены глубина оптической модуляции терагерцового излучения, достигающая 4 % (при толщине 3 нм), и его скорость 50 ГГц при использовании лазерных оптических импульсов на центральных длинах волн 400 и 800 нм. Кроме того, проанализированы спектры фотоиндуцированной динамической проводимости и динамика, соответствующая релаксации свободных носителей заряда в терагерцовом диапазоне.

M.I. PAUKOV<sup>1</sup>, D.I. YAKUBOVSKY<sup>1</sup>, A.S. MARAKULIN<sup>1</sup>,  
S. SUN<sup>2</sup>, Y. ZANG<sup>2</sup>, M.G. BURDANOVA<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

<sup>2</sup>Capital Normal University, Beijing

<sup>3</sup>Prokhorov Institute of General Physics RAS, Moscow

## **THE DEPENDENCE OF MODULATION DEPTH AND SPEED OF THE TERAHERTZ RADIATION FOR ULTRATHIN SMOOTH GOLD FILMS**

The results of experiments on optical pump – terahertz probe of ultrathin smooth gold films of various thicknesses (2–8 nm) are presented. In particular, the depth of optical modulation of terahertz radiation, reaching 4 % (at a thickness of 3 nm) and its speed of 50 GHz when using laser optical pulses at central wavelengths of 400 and 800 nm, were determined. In addition, the spectra of photoinduced dynamic conductivity and dynamics corresponding to the relaxation of free charge carriers in the terahertz range are analyzed.

Поиск материалов с хорошими свойствами проводимости в терагерцовом (ТГц) диапазоне необходим для потенциальных применений в области связи. Металлические наноматериалы играют ведущую роль в

этой задаче. Золото зарекомендовало себя как материал с низкими омическими потерями, низким уровнем окисления и важной способностью легко возбуждать плазмоны, поэтому сплошные тонкие плёнки золота являются очень перспективной платформой для ТГц-исследований. Например, известно, что металлические полосовые поляризаторы обладают высокой селективностью поляризации. Кроме того, проводимость плёнок может изменяться с помощью оптических импульсов, что открывает путь к перестраиваемым устройствам.

Целью работы является экспериментальное исследование фотопроводящих динамических свойств сплошных ультратонких плёнок золота в терагерцовом диапазоне. Экспериментальные измерения проводились по схеме оптической накачки-терагерцового зондирования с использованием фемтосекундного лазерного усилителя Spectra-Physics, который подавал импульсы частотой 1 кГц, 35 фс, 800 нм, генерируемые генератором Spectra-Physics Mai Tai. Зондирующий импульс ТГц был сгенерирован с использованием кристалла  $\langle 110 \rangle$  ZnTe толщиной 1 мм и зарегистрирован с помощью другого кристалла  $\langle 110 \rangle$  ZnTe толщиной 1 мм. ТГц-луч фокусировался на образце в точке диаметром 1 мм с помощью внеосевых параболических зеркал с высокой числовой апертурой, в то время как оптический луч накачки длиной волны 400 – 800 нм имел пятно на порядок больше примерно на 5 мм для всех измерений. Оптический луч накачки был срезан на частоте 130 Гц.

В результате измерения были получены динамики пропускания (рис. 1) при изменении времени задержки зондирующего излучения относительно накачивающего и временные формы терагерцового сигнала при фиксированном времени задержки для определения спектра фотопроводимости образцов плёнок на кварцевых подложках.

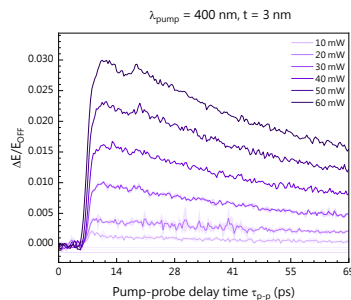


Рис. 1. Динамика изменения сигнала терагерцового излучения при оптической накачке образца толщиной 3 нм излучением длиной волны 400 нм

Д.Р. АБЕУОВ, А.К. АЙМУХАНОВ, А.К. ЗЕЙНИДЕНОВ,  
А.Ж. РУСТЕМ

*Карагандинский национальный исследовательский университет  
им. акад. Е.А. Букетова, Казахстан*

## **УСИЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОН-ФОТОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА ГРАНИЦЕ КРЕМНИЙ-ЗОЛОТО**

В данной работе показано резкое усиление длинноволнового широкополосного плеча в рамановских спектрах кремниевых подложек вблизи границы с тонкой золотой плёнкой переменной толщины. Установлена корреляция этого усиления с нанометровыми морфологическими неоднородностями ( $< 10$  нм). Широкий спектральный сигнал интерпретируется как электронное рамановское рассеяние, связанное с забросом электронов в зону проводимости кремния (Si).

D.R. ABEUOV, A.K. AIMUKHANOV, A.K. ZEINIDENOV,  
A.Zh. RUSTEM

*Karaganda National Research University named after acad. Ye.A. Buketov, Kazakhstan*

## **ENHANCEMENT OF ELECTRON-PHOTON INTERACTION AT THE SILICON-GOLD INTERFACE**

This work shows a sharp enhancement of the long-wave broadband shoulder in the Raman spectra of silicon substrates near the boundary with a thin gold film of variable thickness. A correlation between this enhancement and nanometer-scale morphological inhomogeneities ( $< 10$  nm) has been established. The broad spectral signal is interpreted as electronic Raman scattering associated with electron injection into the conduction band of silicon (Si).

Нами экспериментально продемонстрировано резкое увеличение длинноволнового широкополосного плеча в рамановском спектре Si подложек, покрытых золотой плёнкой переменной толщины, и показано что такой эффект действительно наблюдается при рассеянии света на неоднородностях поверхности размером менее 10 нм. На рис. 1 приведены топографии поверхности чистого кремния и поверхности кремния вблизи границы плёнки золота.

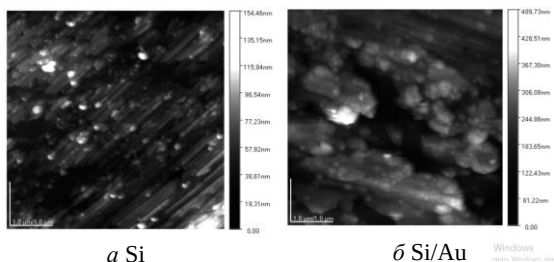


Рис. 1. Топографии поверхности кристалла чистого кремния (а) и кремния, покрытого плёнкой золота, вблизи границы (б), измерения проводились атомно-силовым микроскопом в полуконтактном режиме

Спектры, показанные на рис. 2 были получены вдоль линии перпендикулярной границы золота. Наибольшее увеличение широкополосного излучения, интерпретируемого как электронное рамановское рассеяние, наблюдалось вблизи границы слоя золота, что можно объяснить влиянием нанометровых неоднородностей.

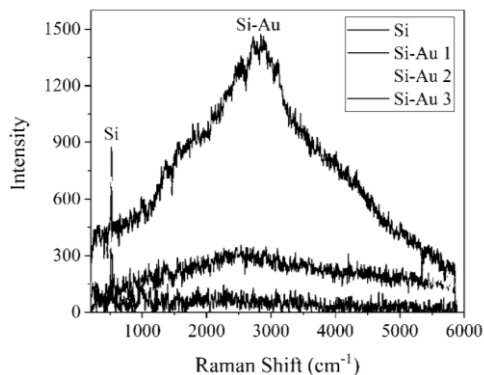


Рис. 2. Спектры комбинационного рассеяния кремниевых подложек

Данный широкополосный пик в спектре интерпретируется как заброска электронов в зону проводимости кремния из валентной зоны [1].

#### Список литературы

1. Kharintsev S.S., Battalova E.I., Noskov A.I., Merham J., Potma E.O., Fishman D.A. Photon-Momentum-Enabled Electronic Raman Scattering in Silicon Glass // ACS Nano. 2024. V. 18. No. 13. P. 9557-9565.

М.А. ГОРЯЕВ

*Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена,  
Санкт-Петербург*

## **ВЛИЯНИЕ КРАСИТЕЛЯ НА ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В КРЕМНИЕВОЙ $p - n$ СТРУКТУРЕ**

Исследованы спектры фото-ЭДС в  $p - n$  структуре кремния с нанесённым на поверхность красителем. Обсуждается характер спектральной зависимости фотоэффекта. Краситель изменяет спектры фотоэффекта за счёт фильтрового эффекта, но спектральной сенсibilизации не наблюдается.

М.А. GORYAEV

*Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint Petersburg*

## **DYE INFLUENCE ON THE PHOTOVOLTAIC EFFECT OF THE SILICON $p - n$ STRUCTURE**

The photo-EMF spectra in the silicon  $p - n$  structure with the dyes applied on the semiconductor surface are investigated. The spectral dependence of photovoltaic effect is discussed. The dye changes the value and the photoeffect spectra as result of the filter effect, but the spectral sensitization is not found.

Кремниевые структуры широко используются в фотоэлектрических преобразователях солнечных батарей [1] и в ПЗС-матрицах систем регистрации [2]. Недостатком кремниевых батарей является невысокий коэффициент экстинкции полупроводника в области непрямых переходов [1]. Органические красители обладают высоким поглощением, и спектральная сенсibilизация красителями позволяет повышать эффективность различных фоточувствительных систем [3]. Исследования спектров и кинетики фотоЭДС показали спектральную сенсibilизацию монокристаллов кремния  $n$ -типа и десенсibilизирующее действие красителя в полупроводниках  $p$ -типа [4 - 8]. В данной работе исследовались спектры фотоЭДС в монокристаллической структуре на основе кремния КЭФ 4.5 толщиной 500 микрон, на поверхности которого путём диффузии бора формировался слой  $p$ -типа, и влияние красителя на фотовольтаический эффект в такой структуре.

Измерения фотоЭДС проводилось конденсаторным методом [9] при модулированном освещении.



Для оценки эффективности внутреннего фотоэффекта измеряемые сигналы  $\Delta U$  нормировались на одинаковое количество падающих на образец квантов света. 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  $15 \text{ нм}^{-2}$  (кривая 2) и  $40 \text{ нм}^{-2}$  (кривая 3). Величина

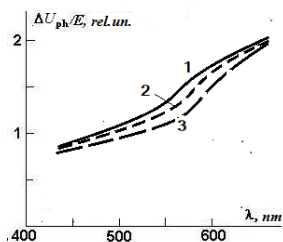


Рис. 1. Спектры фотоЭДС

фотоЭДС исходных образцов (кривая 1) во всей исследованной области спектра растёт с увеличением длины волны в отличие от неокрашенных однородных монокристаллов  $n$ - и  $p$ -типа и  $n$ - $p$  структуры [8, 10], где фотоЭДС уменьшается при увеличении длины волны в соответствии с изменением коэффициента поглощения кремния. Это может быть связано с тем, что в данной структуре реализуются одновременно диффузионная и вентильная компоненты фотоЭДС.

При нанесении красителя на поверхность полупроводника сенсibilизации фотоэффекта не наблюдается, так как критический радиус переноса энергии от красителя в полупроводник составляет 6-8 нм [3], что существенно меньше толщины внешнего слоя  $p$ -типа. Но хорошо заметен фильтровой эффект в области поглощения красителя, который растёт при увеличении концентрации красителя (кривые 2 и 3) [8, 11].

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. // Физика и техника полупроводников. 2004. Т. 38. № 8. С. 937.
2. Boyle W.S. // Rev. Modern Physics. 2010. V. 82. No. 3. P. 2305.
3. Акимов И.А., Черкасов Ю.А., Черкашин М.И. Сенсibilизированный фотоэффект. М.: Наука, 1980.
4. Горяев М.А. // Оптика и спектроскопия. 2019. Т. 127. № 7. С. 167.
5. Горяев М.А. // Сб. научн. трудов XIII Межд. конф. по фотонике и информац. оптике. М.: НИЯУ МИФИ. 2024. С. 271.
6. Горяев М.А. // Тез. докл. XVI Межд. конф. "Диэлектрики-2024". СПб, 2024. С. 16.
7. Горяев М.А. // Сб. научн. трудов XIV Межд. конф. по фотонике и информац. оптике. М.: НИЯУ МИФИ. 2025. С. 333.
8. Goryaev M.A., Smirnov A.P. // Physics of Complex Systems. 2025. V. 6. No. 3. P. 110.
9. Акимов И.А. // Оптико-механ. промышл. 1966. № 5. С. 4.
10. Горяев М.А. // Сб. научн. трудов XI Межд. конф. по фотонике и информац. оптике. М.: НИЯУ МИФИ. 2022. С. 239.
11. Горяев М.А., Пименов Ю.Д. // Успехи научной фотографии. 1980. Т. 20. С. 96.

С.К. ЛЕБЕНКОВА, Л.Д. МИЛЬШИНА

*Брянский государственный университет им. акад. И.Г. Петровского*

**ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ  
ЭЛЕМЕНТАМИ НА СТРУКТУРУ И КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ ЩЁЛОЧНО-ЗЕМЕЛЬНЫХ  
ВОЛЬФРАМАТОВ**

Приведены результаты определения характеристических частот колебаний соединений состава  $Ba_xSr_{1-x}WO_4$  ( $x = 0,25; 0,5; 0,75$ ; мол. %), легированных редкоземельными элементами. Произведён расчёт энергии связи  $Me-O$ . Результаты сопоставимы с теоретическими данными.

S.K. LEBENKOVA, L.D. MILSHINA

*Bryansk State University named after Academician I.G. Petrovsky*

**EFFECT OF REE ELEMENT ALLOYING  
ON THE STRUCTURE AND OSCILLATION  
CHARACTERISTICS OF ALKALI-EARTH TUNGSTAMATES**

The results of determining the characteristic vibration frequencies of  $Ba_xSr_{1-x}WO_4$  ( $x = 0,25; 0,5; 0,75$ ; мол. %) compounds doped with rare-earth elements are presented. The calculation of the  $Me-O$  bond energy has been performed. The results are comparable with theoretical data.

Соединения типа  $ABO_4$  со структурой шеелита, к которым относятся молибдаты, вольфраматы и периодаты, представляют значительный интерес благодаря широкому спектру функциональных свойств и потенциальному применению в областях люминесценции, оптических волокон, сцинтилляторов, катализаторов и электродов [1 - 4]. Возможность замещения катионов в структуре вольфрамата как изовалентными, так и гетеровалентными катионами открывает широкие перспективы для модификации свойств материалов, основанных на этих соединениях.

Особый интерес представляют соединения на основе вольфрама, состава  $MWO_4$  ( $M = Ca, Sr, Ba$ ), которые являются перспективными матрицами для преобразования электромагнитного излучения. Легирование редкоземельными элементами позволяет целенаправленно

модифицировать структуру и, как следствие, физико-химические свойства материалов [5].

Целью работы является исследование влияния гомо- и гетеровалентного легирования на структуру и колебательные характеристики щёлочно-земельных вольфраматов. Были исследованы образцы состава  $Ba_xSr_{1-x}WO_4$  ( $x = 0, 0,25, 0,50, 0,75, 1$  мол. %), в том числе допированные редкоземельными элементами  $Er$  и  $Yb$  в различных пропорциях (1 : 1, 1 : 3, 3 : 1 мол. %). На основе полученных данных ИК-спектроскопии определены характеристические частоты колебаний в области  $380 - 415\text{ см}^{-1}$ , соответствующие колебаниям связи  $Me-O$ , а также колебания группировки  $[WO_4]^{2-}$  в области  $800 - 900\text{ см}^{-1}$ .

Установлено, что частоты колебаний  $W-O$  и  $Me-O$  изменяются в зависимости от состава и степени легирования. Отсутствие дополнительных полос поглощения свидетельствует о равномерном распределении катионов в кристаллической решётке.

По результатам расчёта, энергия связи  $Me-O$  изменяется от  $120,06\text{ кДж/моль}$  ( $BaWO_4$ ) до  $130,55\text{ кДж/моль}$  ( $SrWO_4$ ) по мере увеличения содержания стронция в твёрдых растворах и способствует увеличению прочности связи. Результаты сопоставимы с теоретическими данными (для  $BaWO_4$   $E_{св} = 120\text{ кДж/моль}$ ) [6].

Было установлено, что легирование редкоземельными элементами оказывает незначительное влияние на прочность связи. При этом увеличение содержания  $Yb$  слегка уменьшает прочность связи, тогда как  $Er$  может её слегка усиливать.

#### *Список литературы*

1. Li H., Zhou S. The relationship between the thermal expansions and structures of  $ABO_4$  oxides // Solid State Chem. 2007. V. 180. P. 589-595.
2. Ahmed N., Kraus H., Kim J. Characterisation of tungstate and molybdate crystals  $ABO_4$  ( $A = Ca, Sr, Zn, Cd$ ;  $B = W, Mo$ ) for luminescence lifetime cryothermometry // Materialia. 2018. V. 4. P. 287-296.
3. Spassky D., Mikhailin V., Nazarov M. Luminescence and energy transfer mechanisms in  $CaWO_4$  single crystals // Journal of Luminescence. 2012. V. 132 (10). P. 2753-2762.
4. Thangadurai V., Knittlmayer C., Weppner W. Metathetic room temperature preparation and characterization of scheelite – type  $ABO_4$  ( $A = Ca, Sr, Ba, Pb$ ;  $B = Mo, W$ ) powders // Mater. Sci. Eng. 2004. V. 106. P. 228-233.
5. Monkawaa A., Gessei T., Takimoto Y., Nobuaki J., Toshiaki W., Nobuyuki S. Highly sensitive and rapid gas biosensor for formaldehyde based on an enzymatic cycling system // Sensors and Actuators B: Chemical. 2015. V. 210. P. 241-247.
6. Нейман А.Я. Явления электро- и массопереноса и сопряженные процессы в сложных кислородных соединениях с амфотерным характером проводимости: дисс. д-ра хим. наук. Свердловск, 1989.

Л.Д. МИЛЬШИНА, С.К. ЛЕБЕНКОВА

*Брянский государственный университет им. акад. И.Г. Петровского*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЁРДЫХ РАСТВОРОВ НА ОСНОВЕ ВОЛЬФРАМАТОВ СТРОНЦИЯ И КАЛЬЦИЯ**

Методом ИК-спектроскопии исследованы твёрдые растворы вольфраматов стронция и кальция. На основе полученных данных определены частоты фоновых колебаний в области  $411 - 439 \text{ см}^{-1}$ , для твёрдых растворов  $820 \text{ см}^{-1}$ .

L.D. MILSHINA, S.K. LEBENKOVA

*Bryansk State University named after Academician I.G. Petrovsky*

## **INVESTIGATION OF THE STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF SOLID SOLUTIONS BASED ON STRONTIUM AND CALCIUM TUNGSTATES**

Solid solutions of strontium and calcium tungstates have been studied by IR spectroscopy. Based on the data obtained, the frequencies of background vibrations in the range of  $411 - 439 \text{ cm}^{-1}$  and  $820 \text{ cm}^{-1}$  for solid solutions were determined.

Метод ИК-спектроскопии представляет собой информативный метод для изучения твёрдых растворов на основе вольфрамата стронция и кальция, позволяющий получать информацию о структурных изменениях и характере химических связей в этих соединениях. Соединения типа шеелита  $\text{MWO}_4$  ( $\text{M} = \text{Sr}, \text{Ca}$ ) демонстрируют основные полосы поглощения в области  $400 - 1000 \text{ см}^{-1}$ , с центром около  $928, 405$  и  $833 \text{ см}^{-1}$  на основе мод  $\nu_s, \delta$  (деформационное ассиметричное колебание),  $\nu_{as}$  и групп  $\text{WO}_4$  соответственно [1, 2]. Основным объектом изучения в данном случае выступают колебательные моды тетраэдрических анионов  $[\text{WO}_4]^{2-}$ , которые проявляются в виде характерных полос поглощения в инфракрасном спектре.

Целью работы является определение частот фоновых колебаний на основе данных ИК-спектроскопии для соединений  $\text{Sr}_{100-x}\text{Ca}_x\text{WO}_4$  ( $x = 1; 3; 1; 25 \text{ мол. \%}$ )

Для вольфрамата кальция прослеживаются характеристические полосы поглощения, соответствующие колебаниям в тетраэдрических группах  $[\text{WO}_4]^{2-}$ . Сильная полоса поглощения при  $819 \text{ см}^{-1}$  объясняется

асимметричным валентным растяжением ( $\nu_3$ ) связей W-O в тетраэдрах  $[\text{WO}_4]^{2-}$ . Спектральная линия при  $439\text{ см}^{-1}$  (асимметричное деформационное колебание ( $\nu_4$ )  $[\text{WO}_4]^{2-}$ ) обусловлена колебаниями связи W-O-W. Линия при  $611\text{ см}^{-1}$  относится к структурным колебаниям W-O и соответствует моноклинной сингонии.

Для вольфрамата стронция прослеживается сильная полоса поглощения при  $822\text{ см}^{-1}$  и соответствует асимметричным валентным растяжением ( $\nu_3$ ) связей W-O в тетраэдрах  $[\text{WO}_4]^{2-}$ , а также линия при  $411\text{ см}^{-1}$  соответствующая асимметричным деформационным колебанием ( $\nu_4$ ) связи W-O-W.

В системах  $\text{Sr}_{99}\text{Ca}_1\text{WO}_4$  и  $\text{Sr}_{97}\text{Ca}_3\text{WO}_4$  присутствует сильная полоса поглощения около  $819\text{ см}^{-1}$  и линия при  $411\text{ см}^{-1}$ . Наблюдаемые колебательные частоты занимают промежуточное положение между значениями для чистых соединений, а также отсутствуют пики, характерные для механической смеси фаз.

Для систем  $\text{Sr}_{93}\text{Ca}_7\text{WO}_4$ ,  $\text{Sr}_{90}\text{Ca}_{10}\text{WO}_4$  и  $\text{Sr}_{95}\text{Ca}_5\text{WO}_4$  наблюдается сильная полоса поглощения около  $819\text{ см}^{-1}$  и полоса при  $411\text{ см}^{-1}$ . Также образовывается слабая полоса при  $439\text{ см}^{-1}$ , что соответствует исходному вольфрамату кальция. Тем самым, можно сказать, что образовался не твёрдый раствор, а механическая смесь  $\text{SrWO}_4$  и  $\text{CaWO}_4$ .

Для образца  $\text{Sr}_{75}\text{Ca}_{25}\text{WO}_4$  характерно наличие полос при  $819\text{ см}^{-1}$  (асимметричное валентные растяжение ( $\nu_3$ ) связей W-O в тетраэдрах  $[\text{WO}_4]^{2-}$  и  $412\text{ см}^{-1}$ , соответствующая асимметричным деформационным колебанием ( $\nu_4$ ) связи W-O-W. А также спектральные линии при  $601\text{ см}^{-1}$ , соответствующая моноклинной сингонии и  $439\text{ см}^{-1}$ , принадлежащая исходному  $\text{CaWO}_4$ .

Полученные ИК-спектры согласуются со структурными данными, полученными при рентгеноструктурных исследованиях.

#### *Список литературы*

1. Lei F., Yan B. Hydrothermal synthesis and luminescence of  $\text{CaMO}_4\text{:RE}_3^+$  (M-W, Mo; RE-Eu, Tb) submicro-phosphors // Journal of Solid State Chemistry. 2008. V. 181. No. 4. P. 855-862.
2. Накамото К. ИК-спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений. М.: Мир, 1966.

О.П. БАРИНОВА, Д.Д. КНЯЗЬКИН, К.И. РУНИНА

*Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва*

## **СИНТЕЗ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ПЕНТААЛЮМИНАТА ЛИТИЯ, АКТИВИРОВАННОГО ИОНАМИ ЖЕЛЕЗА (111)**

Пентаалюминат лития, легированный ионами железа (111), получен методом твердофазного синтеза при температуре 1200 °С. Установлена принадлежность  $\text{LiAl}_{4,95}\text{Fe}_{0,05}\text{O}_8$  к кубической сингонии, пространственная группа  $P4_332$ . При исследовании спектра люминесценции (длина волны возбуждения 289 нм) установлен эмиссионный пик в красной области при 667 нм, что указывает на перспективность применения  $\text{LiAl}_{4,95}\text{Fe}_{0,05}\text{O}_8$  в технологии светодиодных источников света.

O.P. BARINOVA, D.D. KNYAZKIN, K.I. RUNINA

*Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow*

## **SYNTHESIS AND LUMINESCENT PROPERTIES OF LITHIUM PENTAALUMINATE ACTIVATED BY IRON IONS (111)**

Lithium pentaaluminate alloyed with iron (111) ions was obtained by solid-phase synthesis at a temperature of 1200 °C.  $\text{LiAl}_{4,95}\text{Fe}_{0,05}\text{O}_8$  was found to belong to cubic syngony, space group  $P4_332$ . When studying the luminescence spectrum (excitation wavelength 289 nm), an emission peak was established in the red region at 667 nm, which indicates the prospects for the use of  $\text{LiAl}_{4,95}\text{Fe}_{0,05}\text{O}_8$  in LED light source technology.

Широкое применение источников белого света на основе высокоэффективных светодиодов инициирует разработку и исследование красных люминофоров со свечением в диапазоне 610 - 670 нм [1, 2], в том числе на основе алюминатов лития различного состава [3 - 5].

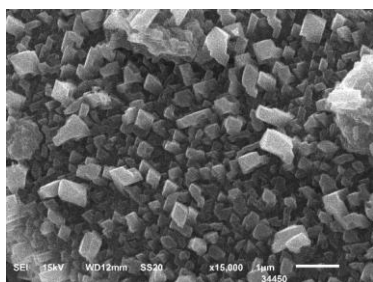
Целью настоящей работы являлось исследование люминесцентных свойств пентаалюмината лития, активированного ионами железа (111).

В работе пентаалюминат лития, легированный ионами железа, получали методом твердофазного спекания при температуре 1200 °С. Исходными реактивами служили: оксид алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , «чда», ТУ 6-09-426-75), гидроксид лития моногидрат ( $\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ , «ч», ГОСТ 8595-83) и оксид железа ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , «чда», ГОСТ 4173-66). Фазовый состав определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) (дифрактометр

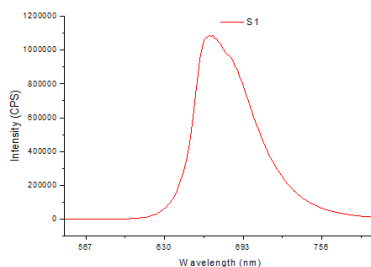
InelEquinox 2000, детектор CPS 180); спектры люминесценции исследовали на спектрофотометрическом комплексе QE65000 «Ocean Optics (UV/VIS)» в диапазоне 300 - 800 нм.

В результате синтеза получены тонкодисперсные порошки бежевого цвета, с хорошей кристаллизацией, размером менее 1 мкм (рис. 1а). По данным РФА при температуре 1200 °С формируется  $\text{LiAl}_{4,95}\text{Fe}_{0,05}\text{O}_8$ , принадлежащий к кубической сингонии, пространственная группа  $\text{P4}_3\text{32}$ .

При исследовании люминесцентных свойств (рис. 1б) пентаалюмината лития, активированного ионами железа (111), установлено, что при возбуждении  $\lambda_{\text{возб.}} = 289 \text{ нм}$  формируется эмиссионный пик с интенсивностью  $1082300 \text{ с}^{-1}$ , он находится в красной области при 667 нм.



а



б

Рис. 1. Морфология (СЭМ x 15000) (а) и спектр люминесценции ( $\lambda_{\text{возб.}} = 289 \text{ нм}$ ) пентаалюмината лития  $\text{LiAl}_{4,95}\text{Fe}_{0,05}\text{O}_8$  (б)

Таким образом, пентаалюминат лития, активированный ионами железа (111), может представлять интерес как люминофор красного свечения для светодиодных источников теплого белого света.

#### Список литературы

1. Aoyama M., et al. Synthesis and characterization of Mn-activated lithium aluminate red phosphors // Journal of luminescence. 2013. V. 136. P. 411-414.
2. Kobayashi R., et al. A new host compound of aluminum lithium fluoride oxide for deep red phosphors based on  $\text{Mn}^{4+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ , and  $\text{Cr}^{3+}$  // ECS Transactions. 2018. V. 88. No. 1. P. 225.
3. Melamed N.T., et al. The fluorescence of  $\text{Fe}^{3+}$  in ordered and disordered phases of  $\text{LiAl}_5\text{O}_8$  // Journal of Luminescence. 1970. V. 1. P. 348-367.
4. Du J., Poelman D. Energy efficient microwave-assisted preparation of deep red/near-infrared emitting lithium aluminate and gallate phosphors // Journal of Luminescence. 2021. V. 237. P. 118168.
5. Clay D., et al. Effect of  $\text{LiAl}_5\text{O}_8$  additions on the sintering and optical transparency of LiAlON // Journal of the European Ceramic Society. 2006. V. 26. No. 8. P. 1351-1362.

С.Н. ДОМАРЕВ, Т.О. ОСКОЛКОВА, Е.О. МОИСЕЕВА<sup>1</sup>,  
А.О. ОРЛОВА

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

<sup>1</sup>*Сколковский институт науки и технологий, Москва*

## **ФОТОИНДУЦИРОВАННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В СПЕКТРАХ МАГНИТНОГО КРУГОВОГО ДИХРОИЗМА НАНОЧАСТИЦ ОКСИДОВ ЖЕЛЕЗА**

Рассмотрены основные закономерности возникновения фотоиндуцированных изменений в спектрах магнитного кругового дихроизма (МКД) суперпарамагнитных наночастиц оксида железа. Представлена интерпретация переходов в спектрах МКД частиц до и после облучения. Получены выводы о возможности применения спектроскопии МКД для контроля состояния наночастиц оксида железа.

S.N. DOMAREV, T.O. OSKOLKOVA, E.O. MOISEYEVA<sup>1</sup>,  
A.O. ORLOVA

*ITMO University, Saint-Petersburg*

<sup>1</sup>*Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow*

## **PHOTOINDUCED CHANGES IN THE MAGNETIC CIRCULAR DICHROISM SPECTRA OF IRON OXIDE NANOPARTICLES**

The basic regularities of photoinduced changes in the magnetic circular dichroism (MCD) spectra of superparamagnetic iron oxide nanoparticles are examined. An interpretation of the transitions in the magnetic circular dichroism spectra of the particles before and after irradiation is presented. Conclusions are drawn regarding the possibility of using MCD spectroscopy to monitor condition of iron oxide nanoparticles.

Наночастицы оксидов железа имеют значительный потенциал для применения в тераностике в качестве диагностических и терапевтических агентов [1, 2]. Ряд из них уже успели пройти стадию клинических исследований и находят применение в медицине [3, 4]. Характеризация наночастиц необходима как на этапе их разработки, так и на этапе их применения для экспрессного контроля их соответствия заявленным характеристикам. Целью данной работы является качественная интерпретация установленных экспериментально изменений в спектрах магнитного кругового дихроизма наночастиц магнетита и маггемита, в результате циклического облучения их водных растворов электромагнитным излучением.



Наиболее выраженные изменения (рис. 1) в спектрах магнитного кругового дихроизма (МКД) образцов наблюдаются в области 2,5 - 5 эВ (495 - 248 нм). Плечо при 3,2 эВ (~ 390 нм) относится к межзонным переходам  $\text{Fe}^{3+}_{\text{В}} (e_{\text{g}\downarrow}) \rightarrow \text{Fe}^{3+}_{\text{А}} (e_{\uparrow})$  и  $\text{Fe}^{3+}_{\text{В}} (e_{\text{g}\downarrow}) \rightarrow \text{Fe}^{3+}_{\text{А}} (t_{2\uparrow})$ . Полоса поглощения в области 3.5 эВ (~ 355 нм) возникает преимущественно за счёт  $\text{O} (2p_{\downarrow}) \rightarrow \text{Fe}^{3+}_{\text{А}} (e_{\uparrow}, t_{\downarrow})$  и  $\text{O} (2p_{\uparrow}) \rightarrow \text{Fe}^{3+}_{\text{В}} (e_{\text{g}\uparrow}, t_{2\text{g}\uparrow})$  межзонных переходов [5]. В процессе облучения светом с длиной волны 445 нм вклад данных полос значительно ослабляется, что приводит к визуальному «смещению» широкой полосы поглощения спектра в более низкоэнергетическую область. При дозах порядка 8,4 Дж спектры МКД образцов маггемита практически полностью повторяют по форме спектры образцов магнетита. Данный факт может указывать на сложную структуру наночастиц типа «ядро-оболочка» с ядром из магнетита и маггемитной оболочкой. Ввиду схожести спектров МКД коллектив авторов данного тезиса также склоняется к типу структуры ядро-оболочка [6].

Показано, что циклическое облучение водных растворов наночастиц маггемита ( $d_{\text{ср}} = 10$  нм) и магнетита ( $d_{\text{ср}} = 10$  нм) электромагнитным излучением с длиной волны 455 нм ( $P_{\text{LED}} = 320$  мВт) приводит к симбатным изменениям в спектрах электронного поглощения и МКД образцов. Установлено, что данные изменения сопровождаются релизом ионов железа, что свидетельствует об фотоиндуцированном растворении наночастиц. Полученные в рамках исследования данные указывают на значительную практическую значимость применения метода МКД в исследовании состояния магнитных наночастиц на основе оксида железа.

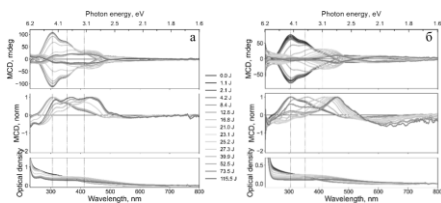


Рис. 1. Спектры магнитного кругового дихроизма МНЧ при облучении светом с длиной волны 445 нм: маггемит (а); магнетит (б)

#### Список литературы

1. Gevart T., et al. // Magnetic Microhydrodynamics. 2024. V. 120. P. 175-215.
2. Dadfar S.M., et al. // Adv. Drug Deliv. Rev. 2019. V. 138, P. 302-325.
3. Feraheme. Ferumoxylol injection // URL: <https://feraheme.com/dosing-administration/>.
4. Nanotherm Therapeutics // URL: <https://www.nanothermtx.com/>.
5. Antonov V.N., et al. // Phys. Rev. B. 2001. V. 64. No. 13. P. 134410.
6. Sharifi Dehsari H., et al. // J. Phys. Chem. C. 2018. V. 122. No. 49, P. 28292-28301.

П.О. БЕЛОУСОВА<sup>1,2</sup>, Н.Н. КУЗЬМИН<sup>1</sup>, В.В. МАЛЫЦЕВ<sup>3</sup>,  
Л.Х. ИНБ<sup>4</sup>, И.А. МОРОЗОВ<sup>5</sup>

<sup>1</sup>*Институт спектроскопии РАН, Троицк*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,  
Москва*

<sup>3</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

<sup>4</sup>*Институт физики твердого тела Китайской академии наук, Хэфэй, Китай*

<sup>5</sup>*Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии  
и геохимии РАН, Москва*

## СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БОРАТА $\text{DyCr}_3(\text{BO}_3)_4$

В данной работе представлено спектроскопическое исследование бората диспрозия и хрома  $\text{DyCr}_3(\text{BO}_3)_4$  в широком температурном диапазоне (от 3,5 до 300 К). В температурных зависимостях спектров поглощения наблюдаются особенности, свидетельствующие о магнитном упорядочении хромовой подсистемы. Приведены описание фазовых переходов и схема штарковских уровней иона  $\text{Dy}^{3+}$  в этом соединении.

P.O. BELOUSOVA<sup>1,2</sup>, N.N. KUZMIN<sup>1</sup>, V.V. MALTSEV<sup>3</sup>,  
L.H. YIN<sup>4</sup>, I.A. MOROZOV<sup>5</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Spectroscopy of the RAS, Troitsk*

<sup>2</sup>*National Research University Higher School of Economics, Moscow*

<sup>3</sup>*Lomonosov Moscow State University*

<sup>4</sup>*Institute of Solid State Physics of Chinese Academy of Sciences, Hefei, China*

<sup>5</sup>*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry  
Russian Academy of Sciences, Moscow*

## SPECTROSCOPIC STUDY OF $\text{DyCr}_3(\text{BO}_3)_4$ BORATE

In this work, a spectroscopic study of dysprosium chromium borate  $\text{DyCr}_3(\text{BO}_3)_4$  in a wide temperature range (from 3.5 to 300 K) is presented. In the temperature dependences of the absorption spectra, features are observed that indicate magnetic ordering of the chromium subsystem. A description of the phase transitions and a diagram of the Stark levels of the  $\text{Dy}^{3+}$  ion in studied compound are given.

Бораты с общей формулой  $\text{REEM}_3(\text{BO}_3)_4$  ( $M = \text{Al, Ga, Sc, Cr, Fe}$ ) обладают интересными оптическими свойствами, благодаря которым находят широкое применение при создании лазеров и нелинейных оптических приборов [1 - 3]. Двойные бораты данного семейства с двумя

магнитными подсистемами, образованными ионами  $4f$ - и  $3d$ -элементов ( $M = \text{Cr}, \text{Fe}$ ), являются материалами с перспективой использования в магнитооптических устройствах [4]. На данный момент наиболее изученными являются бораты железа и редкоземельных элементов [4, 5], в то время как хром содержащие бораты изучены в слабой степени. В литературе представлены структурные, магнитные исследования, а также проведено изучение термодинамических свойств соединения  $\text{DyCr}_3(\text{BO}_3)_4$ , в ходе которых у него было обнаружено наличие двух политипных модификаций (ромбоэдрической и моноклинной) [6, 7]. Этот факт усложняет интерпретацию получаемых экспериментальных данных, в следствие чего имеется необходимость в исследовании этих модификаций по отдельности.

В настоящей работе проведено спектроскопическое исследование  $\text{DyCr}_3(\text{BO}_3)_4$  в широком спектральном ( $2000 - 18000 \text{ см}^{-1}$ ) и температурном (от  $3,5$  до  $300 \text{ K}$ ) диапазонах. В температурных зависимостях спектров поглощения были обнаружены особенности, соответствующие магнитным фазовым переходам. При понижении температуры наблюдается расщепление линий, связанное со снятием вырождения Крамерса с уровней из-за магнитного упорядочения. Это происходит при температуре около  $7 - 8 \text{ K}$ , что согласуется с данными по магнитной восприимчивости. Кроме того, наблюдается фазовый переход вблизи  $T = 4,5 \text{ K}$ . Помимо этого, в работе представлена схема штарковских уровней иона  $\text{Dy}^{3+}$  в борате  $\text{DyCr}_3(\text{BO}_3)_4$ .

Работа выполнена в рамках госзадания Института спектроскопии РАН № FFUU-2025-0004.

#### *Список литературы*

1. Huang M., et al. // J. Phys.: Condens. Matter. 2001. V. 13. P. 1171.
2. Chen C., et al. // Nature. 1995. V. 373. P. 322.
3. Mutailipu M., et al. // Accounts of Chemical Research. 2019. V. 52 (3). P. 791.
4. Vasiliev A.N., Popova E.A. // Low Temp. Phys. 2006; V. 32 (8): P. 735.
5. Chukalina E.P., Bezmaternykh L.N. // Phys. Solid State. 2005. V. 47. P. 1528.
6. Кузьмин Н.Н. и др. // Неорганические материалы. 2020. V. 56 (8). P. 873.
7. Bludov N., et al. // Low Temp. Phys. 2020. V. 46. P. 697.

Н.В. ИЗМАЙЛОВА<sup>1,2</sup>, Л.Г. САМСОНОВА<sup>2</sup>, Р.М. ГАДИРОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет

<sup>2</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

## **ФОТОГЕНЕРАЦИЯ КИСЛОТЫ ЭКСИМЕРНОЙ ЛАМПОЙ XeCl (308 нм)**

Изучен фотолиз 3-хлор- и 3-сульфонат-замещённых бензо[b]тиофен-2-карбокسانيлидов при облучении эксимерной лампой XeCl (308 нм) в растворе толуола и дихлорметана в концентрациях  $10^{-3}$ ,  $10^{-4}$  моль/л. Установлено, что в процессе облучения образуется кислота, обнаружение которой фиксируется образованием протонированной формы 4,6-бис[5-(9-этил-9Н-карбазол-3-ил)тиофен-2-ил]пиримидина, служащего индикатором.

N. V. IZMAYLOVA<sup>1,2</sup>, L. G. SAMSONOVA<sup>2</sup>, R. M. GADIROV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Tomsk State University

<sup>2</sup>Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

## **PHOTOGENERATION OF ACID BY XeCl EXCIMER LAMP (308 nm)**

The photolysis of 3-chloro- and 3-sulfonate-substituted benzo[b]thiophene-2-carboxanilides was studied under irradiation with an XeCl excimer lamp (308 nm) in a solution of toluene and dichloromethane at concentrations of  $10^{-3}$ ,  $10^{-4}$  mol/l. It has been established that acid is formed during irradiation, the detection of which is recorded by the formation of a protonated form of 4,6-bis[5-(9-ethyl-9H-carbazol-3-yl)thiophene-2-yl]pyrimidine, which serves as an indicator.

Фотокислотные генераторы (PAG) – это соединения, которые выделяют кислоты под воздействием света. Кислота, образующаяся из PAG, является ключевым элементом для фотополимерных систем, таких как фоторезисты для производства сверхбольших интегральных схем (VLSI), фотоотверждаемые смолы с эпоксидными блоками, полимеризуемыми кислотой. Ионные и неионные PAG высвобождают анионную часть при фотовозбуждении, ионы H<sup>+</sup> и/или радикалы H извлекаются из сопутствующих источников водорода, таких как влага, растворитель, мономеры и/или полимеры. Это приводит к зависящей от окружающей среды чувствительности обычных PAG, непредсказуемым и менее воспроизводимым побочным продуктам, а также частично неполному образованию кислот, что ограничивает их применение [1]. Новый тип фотокислотных генераторов направлен на решение данной

задачи, кислота образуется в целом за счёт бп-электронной фотоциклизации кольца молекулы при облучении. При прямом фотолизе таких молекул протон и противокислотный остаток отщепляются от исходной молекулы, и образуется молекула кислоты без участия источников водорода (рис. 1). Предполагалось, что синтезированные в институте органического синтеза им. И.Я. Постовского УрО РАН соединения будут образовывать кислоту по схеме, показанной на рис. 1. В настоящей работе мы исследовали данные соединения N1, N2, N3 (рис. 2) отличающиеся между собой заместителями бензтиофенового фрагмента.

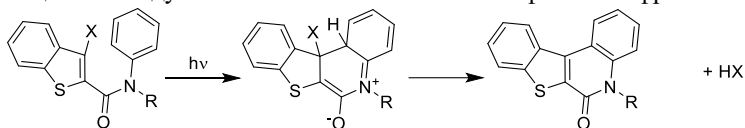


Рис. 1. Схема бп- электронной фотоциклизации бензо[б]тиофен-2-карбоксамидов, где X – уходящая группа (Cl<sup>-</sup>, PhCH<sub>2</sub>CO<sub>2</sub><sup>-</sup> и другие анионы)

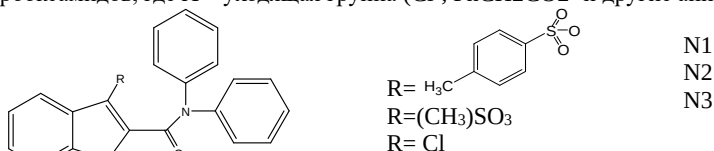


Рис. 2. Структуры исследованных молекул

Растворы соединений в толуоле или в дихлорметане в концентрации  $10^{-3}$ ,  $10^{-4}$  моль/л облучались эксимерной лампой XeCl ( $\lambda = 308$  нм) с последующей регистрацией спектров поглощения в УФ-области. Для подтверждения образования кислоты в процессе фотолиза к облученному раствору добавлялся раствор 4,6-бис[5-(9-этил-9H-карбазол-3-ил)тиофен-2-ил]пиримидина, служащего индикатором (Ind). В кислых средах это соединение протонируется по одному из атомов азота пиримидинового фрагмента, окрашивая раствор в ярко-малиновый цвет. Выполнена оценка квантового выхода фотопревращения для соединений N1-N3, с различными заместителями в толуоле и дихлорметане. Эффективность образования ФГК рассмотрена с точки зрения образования протонированной формы Ind в равных экспериментальных условиях.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Тема № FEWM-2024-0001).

#### Список литературы

1. Kuznetsova N.A., Malkov G.V., et al. // Russian Chemical Reviews. 2020. V. 89. P. 173-190.

М.А. ГЛУХОЕДОВА<sup>1</sup>, С.К. ЕВСТРОПЬЕВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Санкт-Петербургский государственный технологический институт  
(технический университет)*

<sup>2</sup>*АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург*

## **СТРУКТУРА И ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СИСТЕМЫ ZnO-Cr**

Показан способ получения ряда фотокаталитических порошков на основе ZnO с различным содержанием Cr с помощью полимерно-солевого метода. Определено влияние количества хрома в образцах на их кристаллическую структуру, фазовый состав, ширину запрещённой зоны и фотокаталитические свойства.

М.А. GLUKHOEDOVA<sup>1</sup>, S.K. EVSTROPIEV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*

<sup>2</sup>*Vavilov State Optical Institute, Saint Petersburg*

## **STRUCTURE AND PHOTOCATALYTIC PROPERTIES OF THE ZnO-Cr SYSTEM**

A method for producing a line of photocatalytic powders based on ZnO with different Cr contents using the polymer-salt method is shown. The influence of the amount of chromium in the samples on their crystal structure, phase composition, band gap and photocatalytic properties was determined.

Фотокатализаторы предоставляют перспективные возможности использования солнечной энергии для осуществления химических реакций, в частности для фотокаталитического разложения органических загрязнителей в воде и воздухе. Широко используемый наноразмерный фотокаталитический ZnO с шириной запрещённой зоны (ШЗЗ) 3.37 эВ [1] активен под действием УФ-излучения. С целью расширения спектрального диапазона fotocувствительности ZnO применяют легирование переходными металлами или создание гетероструктурных систем с оксидными соединениями этих металлов [2, 3].

В работе был получен ряд образцов на основе ZnO с содержанием Cr 2.5 - 20 мол. %. Было исследовано влияние количества Cr в составе образцов на их кристаллическую структуру, оптические и фотокаталитические свойства.

Фотокаталитические порошки были получены с помощью полимерно-солевого синтеза с использованием нитратов металлов и органического

полимера поливинилпирролидона, путём растворения необходимого количества компонентов в дистиллированной воде с последующими сушкой и термообработкой при 550 °С в течение двух часов.

РФА показал, что порошки, содержащие 2.5 - 7.5 % Cr, состоят из нанокристаллов гексагонального ZnO, а смещение рентгеновских рефлексов в сторону больших углов  $\theta$  может свидетельствовать о замещении ионов  $Zn^{2+}$  меньшими по размеру ионами  $Cr^{3+}$ . Порошки, содержащие большее количество Cr, состоят из кристаллов гексагонального ZnO и кубического  $ZnCr_2O_4$ . Средние размеры кристаллитов ZnO варьируются от 10 до 36 нм, а  $ZnCr_2O_4$  – от 6 до 27 нм. С повышением содержания Cr в образцах происходит уменьшение средних размеров частиц ZnO, что связано с процессом рекристаллизации.

Ширина запрещённой зоны полученных порошков лежит в пределах 3.29 - 3.33 эВ. Это значение несколько меньше, чем у чистого ZnO, что обусловлено кристаллической структурой образцов и её дефектами.

Для исследования фотокаталитических свойств системы ZnO-Cr порошки по 0.01 г помещали в раствор красителя Chicago Sky Blue (CSB) и подвергали воздействию излучения с  $\lambda_{max} = 395$  нм в течение сорока минут. Изменение концентрации красителя фиксировали по спектрам поглощения растворов. Результаты эксперимента показали, что все образцы проявляют фотокаталитическую активность. Константы скорости фотокаталитического разложения CSB принимают значения от 0.014 до 0.050 мин<sup>-1</sup>. При этом наиболее высокой фотокаталитической активностью обладают образцы с содержанием хрома 5, 17,5 и 20 % для которых константы скорости обесцвечивания красителя составили 0.037, 0.031 и 0.050 мин<sup>-1</sup> соответственно. Для образца с 5 % Cr высокая фотокаталитическая активность обусловлена формированием большего количества дефектов структуры ZnO и дополнительных электронных уровней при замещении  $Zn^{2+}$  на  $Cr^{3+}$ . Для композиционных образцов этот эффект связан с формированием гетероструктур и более эффективным разделением носителей зарядов.

Таким образом повышение содержания хрома в составе образцов приводит к уменьшению среднего размера частиц, некоторому сужению ШЗЗ, а также формированию дефектных электронных уровней и наиболее фотокаталитически эффективных гетероструктурных систем.

#### *Список литературы*

1. Srinivasa Rao L., Venkatappa Rao T., et al. // Mater. Chem. Phys. 2018. V. 203. P. 133-140.
2. Shelemanov A., Tincu A., et al. // J. Compos. Sci. 2023. V. 7. P. 263.
3. Mimouni R., Askri B., et al. // Inorg. Chem. Commun. 2020. V. 115. P. 107889.

П.В. КАРПАЧ, Г.Т. ВАСИЛЮК<sup>1</sup>, А.А. МАСКЕВИЧ<sup>1</sup>,  
Т.С. ГЛЕБОВИЧ<sup>1</sup>, А.О. АЙТ<sup>2</sup>, С.А. МАСКЕВИЧ<sup>3</sup>

*Гродненский центр стандартизации, метрологии и сертификации, Беларусь*

*<sup>1</sup>Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Беларусь*

*<sup>2</sup>Центр фотохимии НИИЦ «Курчатовский институт», Москва*

*<sup>3</sup>Международный государственный экологический институт им. А.Д. Сахарова  
БГУ, Минск, Беларусь*

## **ФОТОХРОМНЫЕ НАНОКОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ НАНОЧАСТИЦ Ag И МОЛЕКУЛ ДИАРИЛЭТЕНА В ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЁНКАХ**

Изучены спектральные характеристики наноструктурированных систем, содержащих наночастицы серебра и молекулы диарилэтена в полимерных плёнках.

P.V. KARPACH, G.T. VASILYUK<sup>1</sup>, A.A. MASKEVICH<sup>1</sup>,  
T.S. GLEBOVICH<sup>1</sup>, A.O. AYT<sup>2</sup>, S.A. MASKEVICH<sup>3</sup>

*Grodno Center for Standardization, Metrology, and Certification, Belarus*

*<sup>1</sup>Y. Kupala Grodno State University, Belarus*

*<sup>2</sup>Photochemistry Center of NRC «Kurchatov Institute», Moscow*

*<sup>3</sup>International Sakharov Environmental Institute of BSU, Minsk, Belarus*

## **PHOTOCHROMIC NANOCOMPOSITES BASED ON Ag NANOPARTICLES AND DIARYLETHENE MOLECULES IN POLYMER FILMS**

Spectral characteristics of nanostructured systems containing silver nanoparticles and diarylethene molecules in polymer films were studied.

Фотохромные соединения, обратимо изменяющие свои спектральные и другие физико-химические свойства под действием света, могут использоваться в устройствах оптоэлектроники, молекулярной электроники и фотоники в качестве фотопереключателей, сред 2D и 3D оптической памяти, модуляторах интенсивности света и информационных панелях, в адаптивных и фотоуправляемых светофильтрах, а также сенсорах. Объединение фотохромов в наноконпозиты с наночастицами металла позволяет получать новые уникальные свойства и возможности за счёт плазмонных эффектов.



В настоящей работе изучены спектральные характеристики наноструктурированных систем, содержащих наночастицы серебра и молекулы фотохромного диарилэтена (ДАЭ1) в полимерных плёнках. В том числе, методами спектроскопии комбинационного рассеяния (КР), гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) света и квантовой химии исследованы колебательные спектры этих наноструктурированных систем, (например, рис. 1). Наибольшее усиление испытывают полосы КР около 394, 601, 685, 907, 930, 1048, 1263, 1450, 1535, 1582  $\text{см}^{-1}$ , основной вклад в которые вносят плоские колебания циклов. Это позволяет сделать вывод о наибольшем вкладе плазмонных механизмов в усиление сигнала КР молекул ДАЭ1 (по сравнению с другими электромагнитными механизмами усиления). Полоса около 193  $\text{см}^{-1}$ , относящаяся к колебанию связи «молекула-металл», является индикатором хемосорбции молекул ДАЭ1 на наночастицах Ag.

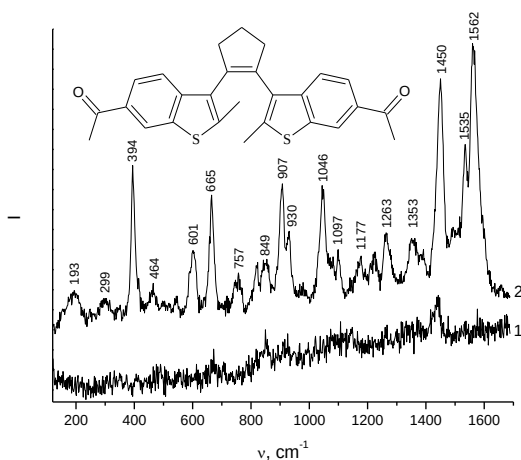


Рис. 1. Спектры комбинационного рассеяния света ДАЭ1 в плёнке ПВХ (1) и гигантского комбинационного рассеяния света нанокомпозитов на основе ДАЭ1 и наночастиц серебра в плёнке ПВХ (2) ( $\lambda_{\text{ex}} = 633 \text{ nm}$ )

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь (задание 1.5 ГПНИ “Фотоника и электроника для инноваций”) и бюджетном финансировании РФ работ, проводимых в рамках Государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» в части синтеза и анализа спектральных свойств фотохромных систем.

Ю.Д. ЛАНТУХ

*Оренбургский государственный университет*

## **СЕНСИБИЛИЗИРОВАННОЕ ПРОСВЕТЛЕНИЕ ПЛЁНКИ «БИОХРОМ»**

В работе представлены результаты по обесцвечиванию фотохромного материала «Биохром» на основе бактериородопсина посредством ферстеровского переноса энергии от молекул донора (красителя акридинового оранжевого). Кинетическая кривая обесцвечивания корректно описывается экспоненциальной функцией. Возвращение системы в исходное состояние происходит самопроизвольно или принудительно путём подсветки на длине волны 405 нм.

Yu.D. LANTUKH

*Orenburg State University*

## **SENSITIZED DISCOLORATION OF BIOCHROM FILM**

This paper presents results on the bleaching of the photochromic material Biochrom, based on bacteriorhodopsin, via Forster energy transfer from donor molecules (acridine orange dye). The bleaching kinetic curve is correctly described by an exponential function. The system returns to its original state either spontaneously or by illumination at a wavelength of 405 nm.

Молекулы бактериородопсина (БР) встроены в клеточные мембраны галофильных бактерий и осуществляют бесхлорофильный фотосинтез в клетках таких бактерий. Структура, свойства и возможности модификации БР всесторонне исследованы [1, 2].

Физико-химические свойства бактериородопсина, в частности его фотохромные свойства, могут быть использованы для разработки различного рода практических устройств. Чаще всего исследуются применения в устройствах записи и обработки оптической информации, создания электрохимических ячеек, сенсоров физических величин [3].

Целью настоящей работы являлась демонстрация обратимого просветления плёнки «Биохром» на основе фотохромизма БР посредством безызлучательного переноса энергии (FRET). Объектом исследования служили образцы плёнки «Биохром» на основе БР, в которые был иммобилизован органический краситель акридиновый оранжевый (АО).

Модуляция пропускания БР в области основной полосы поглощения 500–600 нм осуществлялось на основе FRET от молекул донора энергии –

акридинового оранжевого. АО возбуждался излучением лазера на длине волны 473 нм. Излучение этой длины волны не вызывало само по себе изменений в спектре акцептора – БР, но в комплексе с АО запускало фотохромный цикл БР, то есть исчезновение поглощения в области 500 - 600 нм.

Кинетическая кривая просветления образца на длине волны максимума спектра поглощения БР ( $\lambda = 560$  нм) при облучении лазером с  $\lambda = 473$  нм представлена на рис. 1. Мощность излучения составляла 5 мВт, диаметр области облучения – 1 мм.

Из рис. 1 видно, что характерное время просветления образца составляет секунды. Эффективность просветления в нашем случае составила 38 %. В [2] отмечается, что КПД преобразования зависит от состава плёнки и достигает 90 - 100 %.

Возвращение системы в исходное состояние происходит самопроизвольно или принудительно путём подсветки на длине волны 405 нм. Самопроизвольный процесс восстановления исходной формы БР составляет около 40 с, а искусственный перевод системы в эту форму низкоинтенсивным излучением 405 нм, попадающим в спектр поглощения фотопродукта БР, происходит практически мгновенно.

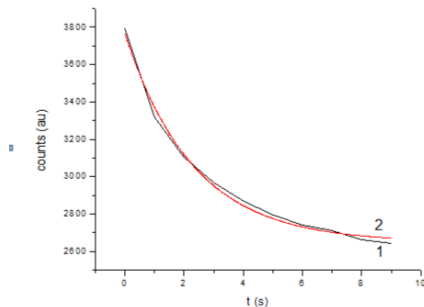


Рис. 1. Кинетическая кривая просветления плёнки «Биохром-АО» при облучении на длине волны 473 нм (1); экспоненциальная аппроксимация кривой просветления (2)

#### Список литературы

1. Дружко А.Б. Бактериородопсин: фундаментальные аспекты и возможности для практического применения. М.: РАН, 2022.
2. Всеволодов Н.Н. Биопигменты – фоторегистраторы: фотоматериал на бактериородопсине. М.: Наука, 1988.
3. Лантух Ю.Д. Влияние температуры на фотохромные свойства пленок бактериородопсина // Тезисы докладов Конференции ХОЛОЭКСПО 2024. С. 304-305.

Ю.Э. ГЕЙНЦ, Е.К. ПАНИНА

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск*

## **ЧИСЛЕННОЕ ИСЛЕДОВАНИЕ АНТИОТРАЖАЮЩИХ СВОЙСТВ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ $\text{TiO}_2$ В ПРИМЕНЕНИИ К СОЛНЕЧНЫМ ЭЛЕМЕНТАМ**

С помощью численного моделирования рассмотрена задача возможного снижения оптических потерь солнечных элементов (СЭ) за счёт уменьшения отражения и повышения доли поглощённого света в объёме элемента, образованного пористым  $\text{TiO}_2$  слоем различной толщины и структурного дизайна, нанесённым на плоскую кремниевую подложку. Проведён подробный анализ характеристик эффективного поглощения и рассеяния света нанопористым антиотражающим слоем различных конструктивных решений, что позволило сформировать практические рекомендации по созданию оптимального просветляющего покрытия, повышающего эффективность работы типичных СЭ на основе кристаллического кремния.

Yu.E. GEINTS, E.K. PANINA

*V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the RAS, Tomsk*

## **NUMERICAL STUDY OF ANTI-REFLECTIVE PROPERTIES OF NANOSTRUCTURED $\text{TiO}_2$ COATINGS APPLIED TO SOLAR CELLS**

Using numerical simulation, we explored the potential for reducing optical losses in solar cells by reducing reflection and increasing the proportion of light absorbed within the cell volume. The cells were formed by porous  $\text{TiO}_2$  layers of varying thickness and structural design applied to a flat silicon substrate. A detailed analysis of the efficient absorption and scattering characteristics of nanoporous antireflective layers with various design solutions was conducted, allowing us to formulate practical recommendations for creating an optimal antireflective coating that improves the performance of typical crystalline silicon-based solar cells.

Основная проблема в солнечной энергетике – оптические потери при отражении света от поверхности фотоэлектрических элементов [1]. В настоящей работе с помощью численного моделирования рассматривается задача рассеяния оптического излучения в спектральном диапазоне солнечного света на кремниевой подложке толщиной 300 нм с нанесённым на неё пористым просветляющим  $\text{TiO}_2$  покрытием различной толщины (12.5 ÷ 500 нм) и структурного дизайна. Проведён подробный

анализ характеристик эффективного поглощения и рассеяния света нанопористым антиотражающим слоем двух принципиально различных структурных типов, образованных либо в виде нескольких слоёв плотно упакованных наносфер (рис. 1а), либо сплошного слоя с хаотично расположенными вертикальными нанопорами диаметром  $25 \div 200$  нм, заполненными воздухом (рис. 1б).

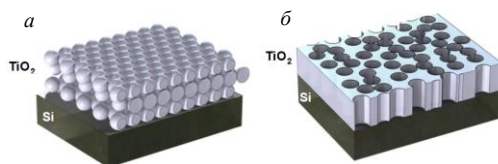


Рис. 1. Структурные типы антиотражающего слоя: самосборка наносфер (а) и случайное распределение нанопор (б)

Установлено, что просветляющее покрытие с достаточно крупными субволновыми воздушными порами ( $\approx 200$  нм) характеризуется более низким оптическим отражением и способно снизить коэффициент отражения кремниевое слоя до трёх раз интегрально по солнечному спектру. При этом многослойная микросборка из  $\text{TiO}_2$  наносфер с таким же значением пористости антиотражающей структуры демонстрирует практически вдвое меньший эффект (рис. 2).

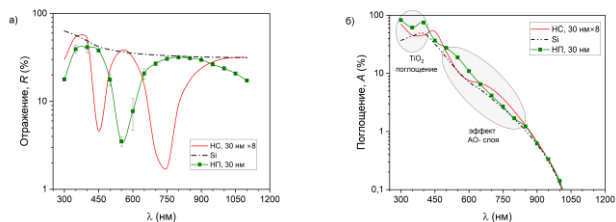


Рис. 2. Спектральный ход коэффициентов оптического отражения  $R$  (а) и поглощения  $A$  (б) в Si подложке с различными типами пористого  $\text{TiO}_2$  слоя

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИОА СО РАН.

#### Список литературы

1. Thomas R.E., Varma S., Waechter D., Dodd C.X., Das S.R. // Can. J. Phys. 1989. V. 67. P. 430-434.

В.В. КОЛИСНИЧЕНКО<sup>1</sup>, Д.С. ДАЙБАГЕ<sup>1,2,4</sup>, Д.М. ДАЙБАГЕ<sup>5</sup>,  
А.В. ОСАДЧЕНКО<sup>1,2</sup>, И.А. ЗАХАРЧУК<sup>1</sup>, С.А. АМБРОЗЕВИЧ<sup>1,3</sup>,  
А.С. СЕЛЮКОВ<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

<sup>2</sup>МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

<sup>3</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

<sup>4</sup>Московский политехнический университет

<sup>5</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СПЕКТРОВ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Исследована температурная зависимость спектров люминесценции нанокристаллов CdTe / SiO<sub>2</sub> в диапазоне 95 - 320 К. Проведена аппроксимация спектров с использованием моделей Фэна и Варшни. Показано, что модель Фэна удовлетворительно описывает экспериментальные данные. Обсуждаются перспективы применения методов искусственного интеллекта для более точного прогнозирования оптических свойств наноматериалов.

V.V. KOLISNICHENKO<sup>1</sup>, D.S. DAIBAGYA<sup>1,2,4</sup>, D.M. DAIBAGYA<sup>5</sup>,  
A.V. OSADCHENKO<sup>1,2</sup>, I.A. ZAKHARCHUK<sup>1</sup>,  
S.A. AMBROZEVICH<sup>1,3</sup>, A.S. SELYUKOV<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University

<sup>2</sup>Russian Technological University MIREA, Moscow

<sup>3</sup>Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

<sup>4</sup>Moscow Polytechnic University

<sup>5</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

## MODELING TEMPERATURE-DEPENDENT LUMINESCENCE OF NANOMATERIALS

The temperature dependence of luminescence spectra of CdTe / SiO<sub>2</sub> nanocrystals was investigated in the range of 95 - 320 K. The spectra were approximated using the Fan and Varshni models. It is shown that the Fan model satisfactorily describes the experimental data. The prospects of applying artificial intelligence methods for more accurate prediction of the optical properties of nanomaterials are discussed.

Нанокристаллы (НК) вызывают большой интерес благодаря своим уникальным оптическим свойствам и возможности управления их фотолюминесценцией (ФЛ), что открывает перспективы для применения в оптоэлектронных устройствах [1 - 3]. В работе исследуется

температурная зависимость ФЛ CdTe / SiO<sub>2</sub> в диапазоне 95 - 320 К с целью определения эволюции параметров спектров при изменении температуры и сопоставления экспериментальных данных с теоретическими моделями.

Спектры ФЛ НК при различных температурах были получены по методике, описанной в [4]. Спектр ФЛ CdTe / SiO<sub>2</sub> характеризуется наличием экситонной и рекомбинационной полосы. Каждый спектр подвергался стандартной обработке (медианная фильтрация, сглаживание фильтром Савицкого–Голея), после чего проводились поиск максимумов ФЛ и аппроксимация двумя гауссианами с использованием библиотеки SciPy языка программирования Python.

Для экситонной полосы ФЛ исследуемых НК были определены следующие параметры с использованием модели Фэна: энергия запрещённой зоны при 0 К  $E_g(0) = 2,211$  эВ (2,17 эВ из [2]), параметр электрон-фононного взаимодействия  $S = 2,67$  (2,39 из [2]), энергия фононов  $\hbar\omega = 23,8$  эВ (12,7 эВ из [2]), ширина линии при нулевой температуре  $\Gamma_0 = 171,4$  мэВ (165 мэВ из [2]). Для модели Варши получены:  $E_g(0) = 2,218$  эВ (2,18 эВ из [2]),  $\alpha = 5,53 \cdot 10^{-4}$  эВ/К (4,92  $\cdot 10^{-4}$  эВ/К из [2]),  $\beta = 241,00$  К.

Аппроксимация температурной зависимости моделями Фэна и Варши дает близкие значения  $E_g(0) \approx 2,21$  эВ, согласующиеся с литературой [2]. При этом остальные параметры двух моделей демонстрируют расхождения с литературными данными [2], что указывает на необходимость учёта специфики конкретных образцов НК. Потенциальное применение методов машинного обучения может обеспечить более точное прогнозирование оптических свойств без ограничений параметрических моделей.

#### *Список литературы*

1. Malashin I., Daibagya D., et al. // Materials. 2024 V. 17. P. 5056.
2. Balakrishnan J. et al. Temperature- and size-dependent photoluminescence in colloidal CdTe and Cd x Zn1– x Te quantum dots // Journal of Physics D: Applied Physics. 2021. V. 54. No. 14. P. 145103.
3. Lee Y.Y., Sriram B., et al. // Nanomaterials. 2024. V. 14. P. 153.
4. Дайбаге Д.С. Люминесцентные и кинетические свойства квантовых точек CdTe/SiO<sub>2</sub> при комнатной и криогенной температуре // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2025. № 2 (119). С. 20-34.
5. Вайнштейн И.А., Зацепин А.Ф., Кортон В.С. О применимости эмпирического соотношения Варши для температурной зависимости ширины запрещенной зоны // Физика твердого тела. 1999. Т. 41. № 6. С. 994-998.

А.В. БОЛТЕНКО, Е.С. НАЗАРЕНКО, М.А. РИДЕР, А.О. ОРЛОВА  
*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ДВУМЕРНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ СЕЛЕНИДА КАДМИЯ ПРИ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

В работе исследованы стационарные и время-разрешённые люминесцентные свойства CdSe нанопластин в растворах, слоях и гибридных структурах с восстановленным оксидом графена (ВОГ) в диапазоне температур 78 - 295 К. Показано, что до 200 К положение полосы экситонной люминесценции не зависит от температуры, а при более высоких температурах наблюдается линейный сдвиг. Обнаружена немонотонная температурная зависимость квантового выхода люминесценции с минимумом около 225 К. Установлено, что усиление взаимодействия между нанопластинами и появление акцепторов заряда или энергии приводят к разнонаправленным изменениям квантового выхода и кинетики люминесценции, что указывает на отличие механизмов мультиэкспоненциального распада люминесценции CdSe нанопластин от квантовых точек.

A.V. BOLTENKO, E.S. NAZARENKO, M.A. RIDER, A.O. ORLOVA  
*ITMO University, Saint-Petersburg*

## **LUMINESCENT PROPERTIES OF TWO-DIMENSIONAL CADMIUM SELENIDE NANOCRYSTALS AT CRYOGENIC TEMPERATURES**

The stationery and time-resolved luminescence properties of CdSe nanoplatelets in solutions, films, and hybrid structures with reduced graphene oxide were investigated in the temperature range of 78 - 295 K. It was shown that below 200 K the position of the excitonic luminescence band is temperature-independent, while at higher temperatures a linear shift is observed due to changes in the crystal lattice parameters. A nonmonotonic temperature dependence of the photoluminescence quantum yield with a minimum around 225 K was observed. It was established that enhanced nanoplatelet–nanoplatelet interaction and the presence of charge or energy acceptors lead to oppositely directed changes in the quantum yield and luminescence kinetics, indicating a mechanism of multiexponential excitonic luminescence decay in CdSe nanoplatelets that differs from that in quantum dots.

CdSe нанопластины (НП), коллоидные двумерные нанокристаллы, представляют собой перспективный класс люминесцентных материалов.



CdSe НП обладают большой площадью поверхности, узкими полосами люминесценции и большими силами осцилляторов экситонных переходов, что делает их особенно перспективными для применения в современной фотонике биомедицине и оптоэлектронике [1]. При комнатной температуре  $A_2B_6$  квантовые нанокристаллы характеризуются мультиэкспоненциальным распадом экситонной люминесценции, что обусловлено наличием бликинга, переключением нанокристаллов между состояниями с разной эффективностью безызлучательной релаксации электронного возбуждения [2, 3].

В работе исследованы стационарная и время-разрешённая люминесценция CdSe НП в растворах, в слоях и в составе гибридных структур с восстановленным оксидом графена (ВОГ) при температурах в диапазоне 78 - 295 К. Показано, что при температуре выше 200 К наблюдается линейная зависимость положения полосы люминесценции от температуры (рис. 1а), обусловленная изменением параметров кристаллической решётки.

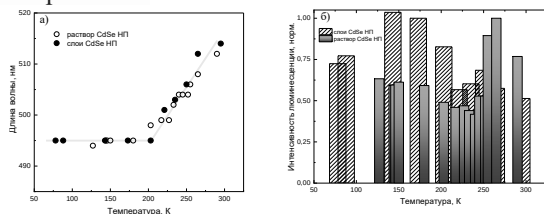


Рис. 1. Температурные зависимости положения полосы (а) и квантового выхода люминесценции (б) CdSe НП в растворе и слое

Для квантового выхода люминесценции НП (рис. 1б) наблюдается сложная температурная зависимость с локальным минимумом около 225 К. Установлено, что для CdSe НП увеличение взаимодействия НП-НП при переходе от растворов к слоям или гибридным структурам НП-ВОГ их квантовый выход люминесценции и кинетика люминесценции изменяются разнонаправленно, что нехарактерно для квантовых точек [4]. Это может свидетельствовать о принципиально разной природе возникновения мультиэкспоненциального распада их экситонной люминесценции в сравнении с квантовыми точками.

#### Список литературы

1. Benjamin T., et al // Chemical Reviews. 2023. V. 123. P. 3543.
2. Efros A.L., Nesbitt D.J. // Nature Nanotechnology. 2016. V. 11. P. 661.
3. Bodunov E.N., Simoes Gamboa A.L. // J. Phys. Chem. 2018. V. 122. P. 10637.
4. Kolesova E., et al // J. Phys. Chem. 2019. V. 123. P. 14790.

В.С. ИВАНОВА<sup>1</sup>, А.В. ОСАДЧЕНКО<sup>1,2</sup>, А.В. РЫЖОВ<sup>3</sup>,  
Д.С. ДАЙБАГЕ<sup>1,2,4</sup>, И.А. ЗАХАРЧУК<sup>1</sup>, Д.М. ДАЙБАГЕ<sup>5</sup>  
<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
<sup>2</sup>МИРЭА – Российский технологический университет, Москва  
<sup>3</sup>ООО «Химтех», Москва  
<sup>4</sup>Московский политехнический университет  
<sup>5</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

## **ВЛИЯНИЕ ОКРУЖЕНИЯ НА ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА КОМПЛЕКСОВ $\text{Eu}^{3+}$ : ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДЖАДДА–ОФЕЛЬТА**

Приведены результаты исследования люминесцентных комплексов  $\text{Eu}^{3+}$  с лигандом бензоилтрифторацетона и оксидом трифенилфосфина, отличающихся строением координационной сферы. Для комплексов определены излучательные и безызлучательные скорости распада, времена жизни возбуждённого состояния, внутренние квантовые выходы люминесценции (до  $\sim 74\%$ ) и параметры Джадда–Офельта.

V.S. IVANOVA<sup>1</sup>, A.V. OSADCHENKO<sup>1,2</sup>, A.V. RYZHOV<sup>3</sup>,  
D.S. DAIBAGYA<sup>1,2,4</sup>, I.A. ZAKHARCHUK<sup>1</sup>, D.M. DAIBAGYA<sup>5</sup>  
<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University  
<sup>2</sup>Russian Technological University MIREA, Moscow  
<sup>3</sup>LLC «Khimtek», Moscow  
<sup>4</sup>Moscow Polytechnic University  
<sup>5</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

## **INFLUENCE OF ENVIRONMENT ON THE LUMINESCENCE PROPERTIES OF $\text{Eu}^{3+}$ COMPLEXES: DETERMINATION OF JUDD–OFELT PARAMETERS**

The results of the study of luminescent  $\text{Eu}^{3+}$  complexes with the ligand benzoyltrifluoroacetone and triphenylphosphine oxide, which differ in the structure of the coordination sphere, are presented. Radiative and non-radiative decay constants, excited state lifetimes, luminescence quantum yields (up to  $\sim 74\%$ ), and Judd–Ofelt parameters were determined for the complexes.

Фотолюминесцентные комплексы  $\text{Eu}^{3+}$  на основе  $\beta$ -дикетонов (ВТФА) и акцепторных лигандов, таких как оксид трифенилфосфина (ТРПО), представляют особый интерес для применения в органических

светоизлучающих устройствах и оптических сенсорах благодаря высокой цветовой чистоте 4f–4f-переходов [1 - 3].

Целью данной работы было исследование люминесцентных свойств комплексов на основе  $\text{Eu}^{3+}$ . Были изучены следующие комплексы: Синтез проводился по методике, описанной ранее [4].

Были получены спектры фотолюминесценции комплексов 1 - 3, включающие переходы  $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_J$  ( $J = 0 - 4$ ), демонстрирующие характерное доминирование полосы  $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_2$  (~ 615 - 620 нм) [5]. Для всех образцов кривые затухания были аппроксимированы моноэкспоненциальной функцией, характерные времена составили 0,7; 0,9 и 0,8 мс. Расчёт параметров интенсивности 4f - 4f-переходов проводился по известной методике [6]. В табл. 1 приведены экспериментально полученные параметры интенсивности 4f - 4f-перехода  $\Omega_\lambda$ , а также внутренний квантовый выход  $Q_{\text{Ln}}$ .

Таблица 1

| Комплекс | $A_{\text{rad}}, \text{c}^{-1}$ | $A_{\text{nrad}}, \text{c}^{-1}$ | $\Omega_2, 10^{-20} \text{cm}^2$ | $\Omega_4, 10^{-20} \text{cm}^2$ | $Q_{\text{Ln}}, \%$ |
|----------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------|
| 1        | 858,9                           | 679,6                            | 26,7                             | 1,3                              | 55,8                |
| 2        | 859,7                           | 303,1                            | 26,7                             | 1,3                              | 73,9                |
| 3        | 861,4                           | 329,1                            | 26,5                             | 1,4                              | 72,4                |

Анализ таблицы 1 показывает, что излучательные скорости распада  $A_{\text{rad}}$  для всех трёх комплексов практически совпадают и лишь слабо зависят от состава координационного окружения  $\text{Eu}^{3+}$ . Это согласуется с близкими значениями параметров Джадда – Офелъта, отражающих схожую асимметрию и ковалентность связи  $\text{Eu}-\text{O}$  в исследованных системах. Для комплекса 2 наблюдается уменьшение  $A_{\text{nrad}}$  по сравнению с 1, что приводит к росту квантового выхода до ~ 74 % и увеличению времени жизни возбуждённого состояния до 0,9 мс.

Таким образом, полученные результаты подтверждают перспективность комплексов  $\text{Eu}^{3+}$  типа  $\text{Eu}(\text{BTFA})_2(\text{TPPO})_x\text{Cl}_y$  в качестве эффективных люминофоров для органических и гибридных светоизлучающих устройств.

#### Список литературы

1. Binnemans K. // Coord. Chem. Rev. 2015. V. 295. P. 1-45.
2. Eliseeva S.V., Bünzli J.-C.G. // Chem. Soc. Rev. 2010. V. 39. P. 189-227.
3. Hänninen P., Härmä H. Lanthanide Luminescence: Photophysical, Analytical and Biological Aspects. Springer, 2011.
4. Osadchenko A.V., et al. // Phys. Wave Phenom. 2025. V. 33. No. 1. P. 72-77.
5. Carnall W.T., et al. // J. Chem. Phys. 1968. V. 49. P. 4424-4442.
6. Blois L., et al. // Оптика и спектроскопия. 2022. Т. 130. № 1. С. 207-214.

И.М. КРОЛЬ<sup>1,2</sup>, В.Н. БОРОВИКОВ<sup>1</sup>, В.В. СМАКОТИНА<sup>3</sup>,  
О.В. КАРИМОВА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт геологии рудных месторождений, петрографии,  
минералогии и геохимии РАН, Москва*

<sup>2</sup>*Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»*

<sup>3</sup>*АО «Центр аддитивных технологий», Москва*

## **СИНТЕЗ $\alpha$ - $\text{Zn}_2\text{SiO}_4\text{:Mn}^{2+}$ МЕТОДОМ MSS И ЕГО ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА**

Люминофор  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4\text{:Mn}^{2+}$  (2 мол. %) был синтезирован в расплаве NaCl при 810 °С. Образование  $\alpha$ -фазы виллемита подтверждено РФА. Наибольшая эффективность синтеза и максимальная интенсивность люминесценции ( $\lambda_{\text{возб}} = 245$  нм,  $\lambda_{\text{изл}} = 522/542$  нм) достигнуты для состава с избытком  $\text{SiO}_2$  и соотношением  $\text{ZnO/SiO}_2 \sim 1,34$ , что объясняется оптимальной растворимостью компонентов в расплаве.

I.M. KROL<sup>1,2</sup>, V.N. BOROVIKOV<sup>1</sup>, V.V. SMAKOTINA<sup>3</sup>,  
O.V. KARIMOVA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy,  
and Geochemistry of the RAS, Moscow*

<sup>2</sup>*Moscow State University of Technology «STANKIN»*

<sup>3</sup>*Center for Additive Technologies, Moscow*

## **SYNTHESIS OF $\alpha$ - $\text{Zn}_2\text{SiO}_4\text{:Mn}^{2+}$ BY THE MSS METHOD AND ITS LUMINESCENT PROPERTIES**

The  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4\text{:Mn}^{2+}$  phosphor (2 mol %) was synthesized in molten NaCl at 810 °C. The formation of the  $\alpha$ -phase of willemite was confirmed by X-ray diffraction. The highest synthesis efficiency and maximum luminescence intensity ( $\lambda_{\text{exc}} = 245$  nm,  $\lambda_{\text{emitted}} = 522/542$  nm) were achieved for a composition with excess  $\text{SiO}_2$  and a  $\text{ZnO/SiO}_2$  ratio of  $\sim 1.34$ , which is explained by the optimal solubility of the components in the melt.

Ортосиликат цинка (виллемит,  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$ ) – перспективный материал с широкой запрещённой зоной ( $\sim 5.5$  эВ), нашедший применение в люминофорах (pc-wLED, PDP, CRT), медицинской визуализации, дозиметрии [1]. Стабильной фазой является  $\alpha$ - $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$  со структурой фенакита (ромбоэдрическая группа R-3). Параметры ячейки:  $a = b = 13.948$  Å,  $c = 9.32$  Å,  $\gamma = 120^\circ$ . Ионы  $\text{Mn}^{2+}$  изовалентно замещают  $\text{Zn}^{2+}$  в тетраэдрических позициях благодаря близким ионным радиусам.

Люминесценция ионов  $Mn^{2+}$  в тетраэдрических позициях (переход  ${}^4T_1({}^4G) \rightarrow {}^6A_1({}^6S)$ ) характеризуется высокой интенсивностью из-за отсутствия центра симметрии в структуре. Оптимальная концентрация  $Mn^{2+}$  и соотношение  $ZnO/SiO_2$  в шихте являются предметом дискуссии, так как зависят от метода синтеза и летучести соединений марганца [2].

В данной работе синтез проводили в муфельной печи при  $810\text{ }^\circ\text{C}$  в течение двух часов в расплаве  $NaCl$  в корундовых тиглях. Полученную смесь отделяли от  $NaCl$  в дистиллированной воде. РФА показал образование фазы  $\alpha\text{-}Zn_2SiO_4$  без видимых примесей. Спектры фотолюминесценции образца, полученные при возбуждении 245 нм, демонстрирует полосу излучения с максимумом около 525 нм. Данная полоса характерна для ионов  $Mn^{2+}$ , находящихся в тетраэдрических позициях кристаллической решётки  $\alpha\text{-}Zn_2SiO_4$ , и соответствует электронному переходу  ${}^4T_1({}^4G) \rightarrow {}^6A_1({}^6S)$ . УФ-возбуждение с длиной волны 245 нм приводит к переходу электрона с основного уровня  ${}^6A_1({}^6S)$  иона  $Mn^{2+}$  в зону проводимости матрицы  $Zn_2SiO_4$ . После этого электрон безызлучательно релаксирует на возбуждённый уровень  ${}^4T_1({}^4G)$   $Mn^{2+}$ , с последующим излучательным переходом на основной уровень, что и вызывает характерное зелёное свечение с максимумом 525 нм (рис. 1).

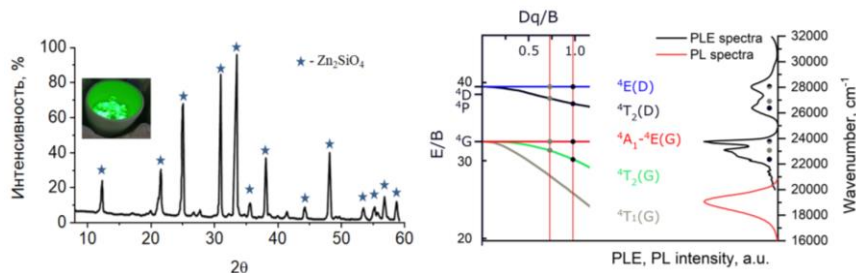


Рис. 1. РФА синтезированного  $\alpha\text{-}Zn_2SiO_4:Mn^{2+}$  и сопоставление диаграммы Танабе–Сугано (линиями указано два неэквивалентных положения, в которых  $Mn^{2+}$  замещает  $Zn^{2+}$  в структуре  $\alpha\text{-}Zn_2SiO_4$ ) со спектром люминесценции

#### Список литературы

1. Kandarakis I., et al. Evaluating  $Zn_2SiO_4:Mn$  phosphor for use in medical imaging radiation detectors // Applied Physics A. 1998. V. 67. P. 521-525.
2. Parmar M.C., et al. Role of  $SiO_2$  in  $Zn_2SiO_4:Mn^{2+}$  phosphor used in optoelectronic materials. 2009.

А.Д. ФАТЕЕВ, О.В. ДЕВИЦКИЙ<sup>1</sup>

*Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь*

*<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН,  
Ростов-на-Дону*

## **НОВЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЙ III-V-Bi ДЛЯ ПРИБОРОВ ИК-ДИАПАЗОНА**

Приведены результаты экспериментов по изучению кинетики роста тонких плёнок твёрдых растворов  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Bi}_y$  методом импульсного лазерного напыления на подложке Si (111). Определено влияние плотности энергии в лазерном импульсе в интервале от 1,7 до 2,6 Дж/см<sup>2</sup> на получаемые тонкие плёнки.

A.D. FATEEV, O.V. DEVITSKIY<sup>1</sup>

*North Caucasus Federal University, Stavropol*

*<sup>1</sup>Federal Research Center Southern Scientific Center of the RAS, Rostov-on-Don*

## **NEW SEMICONDUCTOR MATERIALS BASED ON III-V-Bi COMPOUNDS FOR IR DEVICES**

The results of experiments on the kinetics of growth of thin films of  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Bi}_y$  solid solutions by pulsed laser sputtering on a Si (111) substrate are presented. The effect of the energy density in a laser pulse in the range from 1.7 to 2.6 J/cm<sup>2</sup> on the resulting thin films has been determined.

Исследования разбавленных висмутидов III-V-Bi имеет высокий интерес в мире, поскольку этот класс материалов имеет высокую актуальность практических применений в оптоэлектронике и фотонике. Однако прогресс в области применения III-V-Bi сдерживается проблемами технологии их выращивания. Поскольку атом висмута намного крупнее атомов мышьяка или сурьмы и обладает сильной способностью к поверхностной сегрегации при высоких температурах, внедрение Bi в решётку GaAs при обычных условиях роста III-V невозможно и требует неординарных решений. Среди методов получения висмутсодержащих полупроводников различают молекулярно-лучевую эпитаксию (МЛЭ), газовую эпитаксию металлоорганических соединений (МОСГФЭ) и импульсное лазерное напыление (ИЛН) [1]. При выращивании многокомпонентных твёрдых растворов методами МЛЭ и МОСГФЭ, как и в предлагаемом нами методе ИЛН появляются капли [2] на поверхности

роста из-за возникновения сложных диффузионных процессов на поверхности роста. Однако метод ИЛН для эпитаксиального роста плёнок является сугубо неравновесным и для получения плёнок высокого кристаллического совершенства необходимо существенно расширить диапазон условий проведения экспериментов.

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование кинетики роста плёнок  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Bi}_y$ . Тонкие плёнки были получены из мишени с составом  $\text{In}_{0,17}\text{Ga}_{0,83}\text{As}_{0,96}\text{Bi}_{0,04}$  при помощи лазера с длиной волны 532 нм на подложках Si (111). при плотности энергии лазерного импульса от 1,7 до 2,6 Дж/см<sup>2</sup>. Показано, что при увеличении плотности энергии в импульсе с 1,7 до 2,6 Дж/см<sup>2</sup> толщина плёнки монотонно увеличивается с 90 до 231 нм соответственно. Определено, что снижение плотности энергии в импульсе с 2,6 до 1,7 Дж/см<sup>2</sup> улучшает структурное совершенство плёнок  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Bi}_y$  и снижает плотность капель на их поверхности с 0,509 мкм<sup>2</sup> до 0,397 см<sup>-2</sup>. Методом рентгеновского энергодисперсионного анализа установлено, что при увеличении плотности энергии в импульсе с 1,7 до 2,6 Дж/см<sup>2</sup> концентрация висмута в тонкой плёнке  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Bi}_y$  также увеличивается с 2,9 до 4,7 %. Экспериментально определено, что увеличение плотности энергии в импульсе с 1,7 до 2,6 Дж/см<sup>2</sup> приводит к снижению размера кристаллитов в плёнке от 33,4 до 13,6 нм.

Результаты исследования указывают на потенциал ИЛН для эпитаксиального роста многокомпонентных тонких плёнок и демонстрируют возможность выращивания соединений III–V–Bi на кремниевых подложках.

#### *Список литературы*

1. Pashchenko A.S., et al. // Vacuum. 2024. V. 227. P. 113372.
2. Devitsky O.V. Methods for reducing droplet formation density on the surface of thin semiconductor films by pulse laser deposition // Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials. 2024. V. 16. P. 631-642.

К.Д. ШАТРОВ, А.В. АНДРЕАДИ, И.Л. МАРТЫНОВ,  
А.А. ЧИСТЯКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ КРАЕВЫХ ФИЛЬТРОВ ИЗ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ**

В настоящей работе методом электрохимического травления в водно-спиртовом растворе плавиковой кислоты изготовлены фотонные структуры из пористого кремния, спектр отражения которых имеет вид, характерный для краевых оптических фильтров. Такие структуры имеют подавленные вторичные пики отражения вблизи одной из границ фотонной запрещённой зоны. Структура слоёв изготовленных образцов включала в себя семь периодов со слоями высокой и низкой пористости и несколько дополнительных слоёв, обеспечивающих подавление вторичных пиков в спектре отражения. Одна из границ запрещённой фотонной зоны попадала в область длин волн  $\sim 800$  нм. Величина отражения вторичных пиков не превышала 10 %. Изготовленные структуры могут быть использованы для создания оптических сенсорных элементов, работающих на эффекте сдвига спектра отражения, при сорбции на их поверхности молекул органических веществ.

K.D. SHATROV, A.V. ANDREADI, I.L. MARTYNOV,  
A.A. CHISTYAKOV

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

## **FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF POROUS SILICON EDGE FILTERS**

In the present work, porous silicon photonic structures with reflectance spectra characteristic of optical edge filters were fabricated via electrochemical etching in a hydrofluoric acid–ethanol solution. These structures exhibit suppressed interference oscillations near one of the photonic bandgap edges. The design of the fabricated samples comprised seven periods of alternating high- and low-porosity layers, complemented by several matching layers to ensure secondary peak suppression. One of the photonic bandgap edges was located at a wavelength of approximately 800 nm. The reflectance of the secondary peaks did not exceed 10 %. The fabricated structures are promising for the development of optical sensing elements based on the reflectance shift induced by the adsorption of organic molecules onto the porous surface.

В настоящее время для создания оптических сенсоров активно используют пористый кремний (ПК) [1]. Основная эффект, который



эксплуатируется в этом направлении, это увеличение эффективного показателя преломления ПК при сорбции на его поверхности молекул из окружающей среды. В результате спектр отражения брэгговских зеркал или микрорезонаторов из ПК испытывает длинноволновый сдвиг [1]. Однако в общем случае для фиксации подобного сдвига необходимо спектральное оборудование, что усложняет конструкцию сенсора. Выходом из ситуации может быть регистрация величины отражения оптического излучения на длине волны, которая попадает на край запрещённой фотонной зоны брэгговского зеркала. Однако однозначная интерпретация сдвига спектра через изменение величины отражения требуется максимального подавления вторичных интерференционных пиков вне запрещённой фотонной зоны. В оптике подобные структуры хорошо известны, и на их основе изготавливаются краевые оптические фильтры (longpass, shortpass filters).

В рамках настоящей работы на основе данных литературы для многослойных оптических покрытий [2] была изготовлена серия образцов фотонных структур из ПК с подавленными вторичными интерференционными пиками на одном из краев запрещённой фотонной зоны. В рамках исследований варьировались число периодов слоёв с высоким и низким показателем преломления (низкой и высокой пористостью) и толщина согласующего слоя между основной структурой и подложкой из монокристаллического кремния. Для предварительного моделирования спектра отражения использовался метод матриц переноса. Для изготовления структур использовалось электрохимическое травление в водно-спиртовом растворе плавиковой кислоты. Итоговые структуры обладали краем запрещённой фотонной зоны на длине волны  $\sim 800$  нм, состояли из семи периодов высокой и низкой пористости. Величина отражения в области запрещённой фотонной зоны составляла более 95%, амплитуда вторичных интерференционных пиков на одной из границ не превышала 10 %, ширина приходной области от высокого отражения к низкому составляла  $\sim 45$  нм.

Таким образом, продемонстрировано, что на основе ПК возможно изготовление фотонных структур типа longpass, shortpass фильтров, которые в дальнейшем могут быть использованы для разработки оптических сенсоров паров органических веществ.

*Список литературы*

1. Levitsky I. // Sensors. 2015. V. 15. P. 19968-19991.
2. Macleod H. Thin-film optical filters (third edition). IOP Publishing Ltd, 2001.

Т.М. ЧМЕРЕВА, М.А. ШИХАВЦОВ

*Оренбургский государственный университет***ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМОННОЙ ПОЛУСФЕРИЧЕСКОЙ  
НАНОЧАСТИЦЫ НА ДЕЗАКТИВАЦИЮ КВАНТОВОГО  
ИЗЛУЧАТЕЛЯ**

Исследована зависимость спектров мультипольных поляризуемостей полусферической металлической наночастицы в поле электрического диполя, расположенного вблизи вершины полусферы, от электродинамических параметров системы. Рассчитаны скорости радиационной и нерadiационной дезактивации квантового излучателя, размещённого вблизи наночастицы.

T.M. CHMEREVA, M.A. SHIKHAVTSOV

*Orenburg State University***THE EFFECT OF A PLASMONIC HEMISPHERICAL  
NANOPARTICLE ON THE DEACTIVATION  
OF A QUANTUM EMITTER**

The dependence of the multipole polarizability spectra of a hemispherical metal nanoparticle in the field of an electric dipole located near the top of the hemisphere on the electrodynamic parameters of the system is investigated. The rates of radiation and nonradiative deactivation of a quantum emitter placed near a nanoparticle are calculated.

В данной работе рассмотрена система, состоящая из полусферической плазмонной наночастицы (НЧ) и квантового излучателя, находящегося вблизи вершины полусферы. Выбор системы обусловлен перспективой использования nanoостровков золота или серебра в биосенсорике [1].

Полусферическая частица является частным случаем частицы, состоящей из двух одинаковых полушарий с разной диэлектрической проницаемостью, поэтому пространство делится на три области с разными электродинамическими характеристиками [2]. Потенциал электрического поля, создаваемого диполем квантового излучателя и поляризованной частицей, должен удовлетворять уравнению Лапласа во всех областях. Когда дипольный момент излучателя ориентирован радиально, потенциал поля поляризованной двойной частицы записывается в виде ряда по полиномам Лежандра и вне частицы имеет вид:  $\varphi(r, \theta) = \sum_l D_l^{rad} P_l(\cos \theta) / r^{l+1}$ ,

где  $r$  – расстояние от центра двойной частицы. При касательной

ориентации диполя вдоль оси  $x$  ряд записывается по присоединённым полиномам Лежандра  $\varphi(r, \theta) = \sum_l D_l^{tan} P_l^1(\cos \theta) \cos \alpha / r^{l+1}$ .

Коэффициенты находятся из граничных условий, требующих равенства потенциалов и нормальных составляющих векторов электрической индукции на всех границах раздела сред. Из-за неортогональности полиномов Лежандра на интервале  $0 < \theta < \pi/2$  граничные условия приводят к системе уравнений, содержащих  $2N$  уравнений с  $2N$  неизвестными ( $N$  – число членов в разложении потенциала), которая решается численно. Следуя [3], скорости нерадиационной и радиационной дезактивации квантового излучателя можно описать выражениями

$$(\gamma^{nr})_{rad} = (2d/\hbar) \text{Im} \sum_l (l+1) D_l^{rad} / a^{l+2}, \quad (\gamma^r)_{rad} = 4\omega^3 \sqrt{\varepsilon_1} |d + \varepsilon_1 D_1^{rad}|^2 / (3\hbar c^3),$$

$$(\gamma^{nr})_{tan} = (d/\hbar) \text{Im} \sum_l l(l+1) D_l^{tan} / a^{l+2}, \quad (\gamma^r)_{tan} = 4\omega^3 \sqrt{\varepsilon_1} |d - \varepsilon_1 D_1^{tan}|^2 / (3\hbar c^3),$$

где  $\varepsilon_1$  – диэлектрическая постоянная окружающей среды,  $a$  – расстояние от центра двойной частицы до квантового излучателя,  $d$  – дипольный момент перехода,  $\omega$  – частота перехода квантового излучателя.

На рис. 1 представлена частотная зависимость отношения скорости дезактивации  $(\gamma^r)_{rad}$  квантового излучателя вблизи наночастицы к скорости  $\gamma_0$  в свободном пространстве. Расчёты выполнены для серебряной частицы радиусом  $R = 20$  нм. Другие параметры модели:  $a = 30$  нм,  $N = 200$ ,  $\varepsilon_1 = 2$ . Как видно из рис. 1, замена однородной частицы на полусферическую приводит к появлению дополнительных плазмонных резонансов.

Исследование выполнено при поддержке Минобрнауки РФ, проект № FSGU-2023-0003.

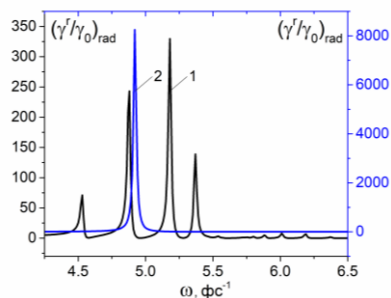


Рис. 1. Спектр относительной скорости дезактивации квантового излучателя вблизи полусферической (1) и однородной (2) серебряной частицы

#### Список литературы

1. Balidescu S., Raju D., Bathini S., Packirisamy M. // *Molecules*. 2020. V. 25. P. 4661.
2. Scherbak S.A., Shustova O.V., Zhurikhina V.V., Lipovskii A.A. // *Plasmonics*. 2014. V. 10 (3). P. 519.
3. Климов В.В. Наноплазмоника. М.: Физматлит. 2009.

А.Н. ХОПЁРСКИЙ, А.М. НАДОЛИНСКИЙ, Р.В. КОНЕЕВ

*Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону*

## ДВУХФОТОННАЯ ИОНИЗАЦИЯ К-ОБОЛОЧКИ ТЯЖЁЛОГО АТОМНОГО ИОНА

Теоретически предсказаны аналитическая структура и абсолютные значения обобщённого сечения двухфотонной резонансной однократной ионизации К-оболочки тяжёлых бериллиепоподобных ионов атомов титана ( $\text{Ti}^{18+}$ ), хрома ( $\text{Cr}^{20+}$ ), железа ( $\text{Fe}^{22+}$ ) и цинка ( $\text{Zn}^{26+}$ ). Установлены прежде всего, эффекты возникновения гигантских резонансов в допороговой области обобщённых сечений и лидирующей роли  $d$ -симметрии конечных состояний ионизации в становлении полного обобщённого сечения в области энергий поглощаемых фотонов жёсткого рентгеновского диапазона.

A.N. HOPERSKY, A.M. NADOLINSKY, R.V. KONEEV

*Rostov State Transport University, Rostov-on-Don*

## TWO-PHOTON IONIZATION OF THE K-SHELL OF A HEAVY ATOMIC ION

The analytical structure and absolute values of the generalized cross section of two-photon resonance single ionization of the K-shell of heavy beryllium-like ions of titanium ( $\text{Ti}^{18+}$ ), chromium ( $\text{Cr}^{20+}$ ), iron ( $\text{Fe}^{22+}$ ) and zinc ( $\text{Zn}^{26+}$ ) atoms were theoretically predicted. First of all, the effects of the emergence of giant resonances in the subthreshold region of generalized cross sections and the leading role of the  $d$ -symmetry of the final ionization states in the formation of the total generalized cross section in the energy region of absorbed photons of the hard X-ray range were established.

Рассматривается процесс двухфотонной резонансной однократной ионизации К-оболочки тяжёлого атомного иона:

$$2\hbar\omega + [0] \rightarrow 1s(n, x)p + \hbar\omega \rightarrow 1s\varepsilon(s, d)[^1S_0, ^1D_2],$$

где  $[0]$  – основное состояние иона,  $\hbar\omega$  – энергия поглощаемого фотона,  $n \in [2; \infty)$  и  $x(\varepsilon) \in [0; \infty)$ . Первые теоретические исследования обобщённых сечений этого процесса проведены в работах авторов [1, 2] для неоноподобного иона атома железа ( $\text{Fe}^{16+}$ ) [1] и изоядерной последовательности атома никеля ( $\text{Ni}^{26+} \rightarrow \text{Ni}^{24+} \rightarrow \text{Ni}^{18+}$ ) [2]. В данном сообщении теория этих работ обобщается на изоэлектронную последовательность бериллиепоподобных атомных ионов

( $\text{Ti}^{18+} \rightarrow \text{Cr}^{20+} \rightarrow \text{Fe}^{22+} \rightarrow \text{Zn}^{26+}$ ) и модифицируется учётом зависимости ширин радиационного распада виртуальных  $1snp$ -состояний фотовозбуждения от главного квантового числа [3]. Результаты расчёта на примере иона  $\text{Zn}^{26+}$  представлены на рис. 1.

Следует ожидать, что результаты на рис. 1 вполне доступны измерению в современном эксперименте с рентгеновским лазером на свободных электронах (например, [4, 5]).

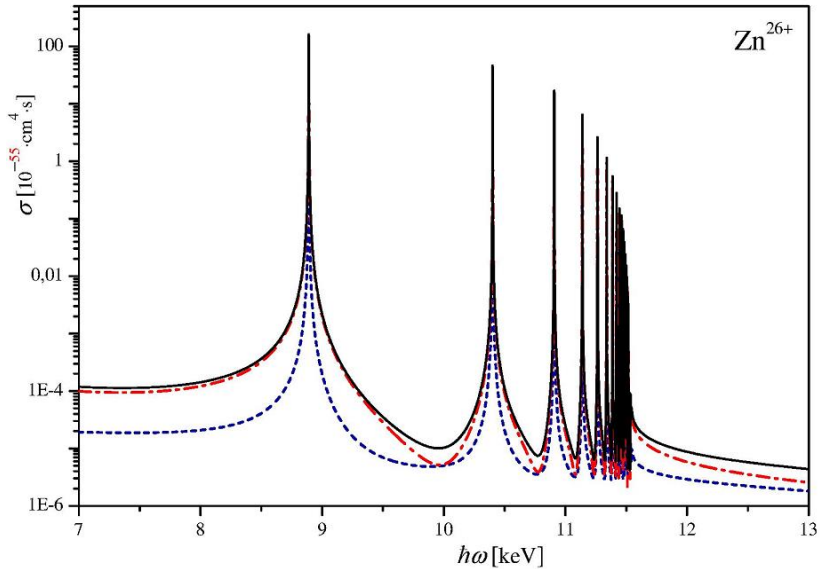


Рис. 1. Обобщённое сечение двухфотонной резонансной однократной ионизации

$K$ -оболочки иона  $\text{Zn}^{26+}$ . Штрих-пунктирная кривая – вклад

$1D_2$  – терма конечного состояния ионизации, штриховая кривая – вклад

$1S_0$  – терма конечного состояния ионизации, сплошная кривая – полное

обобщённое сечение, энергия порога ионизации  $K$ -оболочки  $I_{1S} = 11.544$  keV,  $\hbar\omega$  – энергия поглощаемого фотона

#### Список литературы

1. Хопёрский А.Н., Надолинский А.М., Конеев Р.В. // Опт. и спектр. 2025. Т. 133. С. 703.
2. Hopersky A.N., Nadolinsky A.M., Novikov S.A., Koneev R.V. // arXiv: 2506. 18117v1 [physics. atom-ph].
3. Hopersky A.N., Nadolinsky A.M., Novikov S.A., Koneev R.V. // arXiv: 2509. 23275v1 [physics. atom-ph].
4. Osaka T., Inoue I., Yamada J., et al. // Phys. Rev. Res. 2022. V. 4. P. L012035.
5. Kas J.J., Rehr J.J., Stöhr J., Vinson J. // Phys. Rev. B. 2025. V. 112. P. 045116.

О.В. КОРОВАЙ

*Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко, Тирасполь*

## **ВЛИЯНИЕ УЧЁТА МНОГОФОТОННЫХ ПЕРЕХОДОВ НА ЗАКОН ДИСПЕРСИИ ЧЕТЫРЁХУРОВНЕВОГО АТОМА С ЭКВИДИСТАНТНЫМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ СПЕКТРОМ**

Приведены результаты теоретического исследования системы четырёхуровневых атомов с эквидистантным энергетическим спектром, взаимодействующих с резонансным лазерным излучением с учётом трёх однофотонных, двух двухфотонных переходов и прямого трёхфотонного перехода. Показано, что закон дисперсии состоит из четырёх поляритонных ветвей, предсказываются эффекты взаимодействия и пересечения ветвей закона дисперсии.

O.V. KOROVAI

*Pridnestrovian State University named after T.G. Shevchenko, Tiraspol*

## **THE INFLUENCE OF MULTIPHOTON TRANSITIONS ON THE DISPERSION LAW OF A FOUR-LEVEL ATOM WITH AN EQUIDISTANT ENERGY SPECTRUM**

The results of a theoretical study of a system of four-level atoms with an equidistant energy spectrum interacting with resonant laser radiation are presented. Three one-photon, two two-photon transitions, and a direct three-photon transition are taken into account. It is shown that the dispersion law consists of four polariton branches, and the effects of interaction and intersection of the branches of the dispersion law are predicted.

Исследование особенностей протекания когерентных нелинейных оптических явлений при одновременном учёте однофотонных и многофотонных процессов вызывает интерес с теоретической и прикладной точек зрения из-за реализации возможности контроля и управления процессами поглощения и взаимодействия света с материальными возбуждениями среды. В атомных четырёхуровневых системах возможны многофотонные переходы: двухфотонные переходы – между первым и третьим уровнями, вторым и четвёртым уровнями, трёхфотонный переход между первым и четвёртым уровнями [1 - 6].

Целью работы является теоретическое исследование закона дисперсии четырёхуровневых атомов с эквидистантным энергетическим спектром, взаимодействующих с фотонами ультракороткого импульса резонансного

лазерного излучения при одновременном учёте однотоновых и многофотонных переходов рис. 1.

На рис. 2а видно, что при одновременном учёте однофотонных и двухфотонного процессов возбуждения атома и отсутствии трёхфотонного процесса возникает эффект пересечения двух средних ветвей закона дисперсии в точке  $\delta = 0$  при  $\theta_1 = \pi/2$ , при условии равенства частот Раби  $\Omega_{12}, \Omega_{23}, \Omega_{34}, \Omega_{13}, \Omega_{24}$  и  $\Omega_{14} = 0$ .

При учёте процессов двухфотонного и трёхфотонного возбуждения атома (рис. 2б) возникают эффекты пересечения ветвей закона дисперсии: трёх ветвей – верхней и двух средних ветвей при  $\theta_1 = 0$ , либо нижней и двух средних при  $\theta_1 = \pi$ , двух средних ветвей при  $\theta_1 = 0, \pi$  и  $\omega_{13} = \omega_{24} = \omega_{14} = 1$ , то есть при условии равенства частот Раби  $\Omega_{12}, \Omega_{23}, \Omega_{34}, \Omega_{13}, \Omega_{24}$  и  $\Omega_{14}$  при  $\theta_1 = \pi/2$  эффект пересечения средних ветвей в точке  $\delta = 0$  при  $\omega_{13} = \omega_{14} = 1$ , и  $\omega_{24} = 2$  или  $\omega_{24} = \omega_{14} = 1$ , и  $\omega_{13} = 2$  (рис. 2в).

Учёт трёхфотонного процесса возбуждения атома при  $\omega_{13} = \omega_{24} = 0$  приводит к возникновению эффекта пересечений верхней и I средней и II средней и нижней поляритонных ветвей в при  $\omega_{14} = 1$  и  $\theta_1 = \pi/2$  и при условии равенства частот Раби  $\Omega_{12}, \Omega_{23}, \Omega_{34}$  и  $\Omega_{14}$  (рис. 2г).

Наличие эффектов сближения, расталкивания и пересечения ветвей закона дисперсии при изменении значения величин частот Раби многофотонных переходов  $\Omega_{13}, \Omega_{24}, \Omega_{14}$  можно интерпретировать как изменение силы связи фотонов с атомом и перенормировке энергетического спектра атомных поляритонов.

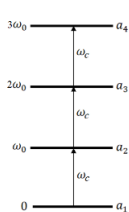


Рис. 1.

Энергетическая  
схема

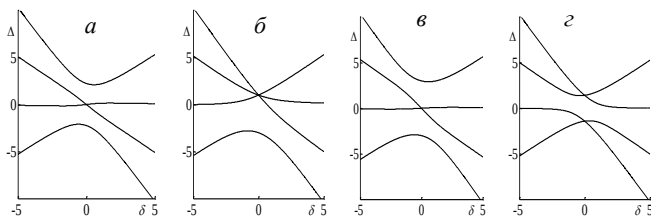


Рис. 2. Законы дисперсии атомных поляритонов

#### Список литературы

1. Якшина Е.А., Третьяков Д.Б. и др. // Квантовая электроника. 2018. Т. 48 (10). С. 886.
2. Kwak H.M., Jeong T., et. al. // Optics Communications. 2016. V. 380, P. 168-173.
3. Nath S.K., Naik V., et. al. // J. Opt. Soc. Am. 2019. V. 36. P. 2610.
4. Tang J., Deng Yu., et. al. // Phys. Rev. Appl. 2019. V. 12. P. 044065.
5. Gasparinetti S., Besse J.-C., et. al. // Phys. Rev. 2019. V. 100. P. 033802.
6. Коровай О.В. // ЖЭТФ. 2022. Т. 161 (5). С. 631-650.

В.А. ГАВРИЛОВЕЦ, Д.А. ГАВРИЛОВЕЦ, М.А. КУЛАГИНА,  
М.А. СУРИНА, С.А. ЧЕБАКОВА, В.В. ФИЛАТОВ

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

## **СПОНТАННОЕ НАРУШЕНИЕ СИММЕТРИИ ПРИ КОЛЛАПСЕ ПОЛЯРИТОННОГО КОНДЕНСАТА В ФОТОННОМ КРИСТАЛЛЕ**

Установлено, что в фотонном кристалле в критических точках зоны Бриллюэна поляритоны конденсируются в *C*-, *P*- и *T*-симметричное состояние. При нагреве конденсат разрушается, и симметрия поляритонного поля пропадает, что может использоваться для изучения спонтанного нарушения симметрии и спектроскопии сопутствующих эффектов в лабораторном оптическом эксперименте.

V.A. GAVRILOVETS, D.A. GAVRILOVETS, M.A. KULAGINA,  
M.A. SURINA, S.A. CHEBAKOVA, V.V. FILATOV

*Bauman Moscow State Technical University*

## **SPONTANEOUS SYMMETRY BREAKING WHEN POLARITON CONDENSATE COLLAPSES IN PHOTONIC CRYSTAL**

The paper reports polaritons in the critical points of the Brillouin zone of a photonic crystal condense into *C*-, *P*- and *T*-symmetrical state. When the condensate collapses, polariton field's symmetry breaks allowing to study spontaneous symmetry breaking and its effects within a laboratory optical experiment.

Спонтанное нарушение симметрии – специфический механизм теории поля, заключающийся в возникновении несимметричного решения задачи с симметричным лагранжианом вследствие (возможно, случайной) асимметрии начальных условий. Так, например, в потенциале

$$V(\varphi) = a + b|\varphi|^2 + c|\varphi|^4,$$

при  $b < 0$ ,  $c > 0$  квантовое поле  $\varphi$  спонтанно флуктуирует из симметричной, но неустойчивой точки  $\varphi_0' = 0$  («ложный вакуум») и скатывается в устойчивый, но несимметричный минимум («истинный вакуум»), в одну из точек  $\varphi_0$  основного состояния, определяемых условием

$$|\varphi_0| = (-b/2c)^{1/2}.$$

С понижением симметрии системы компоненты полевого мультиплета начинают различаться по массам частиц, временам жизни, доступным



каналам распада и т. п., определяя особый, присущий только этой точке  $\phi_0$  конфигурационного пространства, набор вакуумных физических констант.

По современным представлениям, вышеописанный процесс ответствен за эволюцию Вселенной к её нынешнему состоянию  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ , поэтому изучение спонтанного нарушения симметрии квантового поля и сопровождающих его эффектов в рамках лабораторного эксперимента является задачей исключительной важности, способной дать лучшее понимание механизмов, формирующих свойства окружающего мира. В данной работе сообщается о новом способе наблюдения спонтанного нарушения симметрии: при коллапсе поляритонного конденсата в фотонном кристалле – периодической оптической среде с запрещёнными фотонными зонами («стоп-зонами») в видимой области спектра.

В периодической среде взаимодействие электромагнитных квантов (фотонов) с элементарными решёточными возбуждениями (фононами) приводит к формированию гибридных оптических квазичастиц (поляритонов), конденсирующихся на краях стоп-зон в резонансы типа ван Хова. В обратном пространстве эти точки соответствуют особым точкам зоны Бриллюэна (центру и краям) и находятся на стыке областей нормальной и аномальной дисперсии. В области нормальной дисперсии поляритоны правохиральны (волновой вектор  $\mathbf{k}$ , вектор напряжённости электрического поля  $\mathbf{E}$  и вектор напряжённости магнитного поля  $\mathbf{H}$  образуют правую тройку), в области аномальной дисперсии левохиральны, поэтому в точке стыка хиральность отсутствует, и волновая функция  $P$ -симметрична. Соответствуя стоячей волне, она также  $T$ -симметрична. Наконец, из-за отсутствия у поляритонов электрического заряда, ещё и  $C$ -симметрична. Таким образом, симметрия поляритонного поля в конденсате полная:  $C$ ,  $P$  и  $T$ .

Нагрев образца приводит к увеличению плотности фононов, в том числе некогерентных конденсату, взаимодействие с которыми приводит к его декогеренции и распаду. «Выпадающие» из конденсата поляритоны с неизбежностью оказываются в области или нормальной, или аномальной дисперсии, то есть, в этот момент симметрия поля поляритонов спонтанно нарушается. Данное обстоятельство открывает возможность визуального наблюдения и спектроскопии механизмов спонтанного нарушения симметрии в прозрачном фотонном кристалле. В частности, указанным методом предлагается осуществить экспериментальную проверку  $C$ -,  $P$ - и  $T$ -инвариантности механизма Хиггса, придающего в фотонном кристалле поляритонам массу: регистрация любой ( $C$ ,  $P$  или  $T$ ) асимметрии даст указания на физику за пределами Стандартной модели.

О.Ф. ВАСИЛЬЕВА

*Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко, Тирасполь*

**ВРЕМЕННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ПЛОТНОСТИ  
ДИПОЛЯРИТОНОВ В СЛУЧАЕ, КОГДА В СИСТЕМЕ  
В НАЧАЛЬНЫЙ МОМЕНТ ВРЕМЕНИ ПРИСУТСТВУЮТ  
ВСЕ КВАЗИЧАСТИЦЫ**

Приведены результаты теоретического исследования динамики диполяритонов при равенстве начальных разностей фаз между диполяритонами в случае, когда в системе присутствуют все квазичастицы. Показана, что динамика системы определяется соотношением между начальными плотностями диполяритонов накачки обоих импульсов и диполяритонов сигнальной и холостой мод на верхней, нижней и средней ветвях закона дисперсии.

O.F. VASILIEVA

*Pridnestrovian State University named after T.G. Shevchenko, Tiraspol*

**TEMPORAL EVOLUTION OF THE DENSITY  
OF DIPOLARITONS IN THE CASE  
WHEN ALL QUASIPARTICLES ARE PRESENT  
IN THE SYSTEM AT THE INITIAL MOMENT OF TIME**

The results of a theoretical study of the dynamics of dipolaritons are presented with the equality of the initial phase differences between dipolaritons in the case where all quasiparticles are present in the system. It is shown that the dynamics of the system is determined by the ratio between the initial densities of the pump dipolaritons of both pulses and the dipolaritons of the signal and idler modes on the upper, lower and middle branches of the dispersion law.

В последние годы стремительное развитие получила поляритоника – современная научная область, уже продемонстрировавшая свою перспективность применения в лазерах, оптических транзисторах и светоизлучающих диодах [1]. Важную роль играют и диполяритоны, которые открывают множество перспективных направлений в области оптики и фотоники. Применения диполяритонов может привести к улучшению характеристик оптических устройств, таких как лазеры и усилители и транзисторы [2].

Целью работы является теоретические исследования временной эволюции диполяритонов в случае, когда начальные разности фаз между

диполяритонами равны  $\pi/2$  и при отличных от нуля всех диполяритонов на всех трёх ветвях закона дисперсии.

Когда в начальный момент времени в системе присутствуют все квазичастицы, то временная эволюция системы диполяритонов будет происходить по всем трем каналам рассеяния. В этом случае получить точные аналитические решения системы нелинейных дифференциальных уравнений не представляется возможным, поэтому представим результаты численных решений.

В случае, когда начальная плотность диполяритонов накачки первого импульса больше начальной плотности диполяритонов накачки второго импульса и начальная плотность диполяритонов сигнальной моды на средней ветви закона дисперсии больше начальной плотности диполяритонов холостой моды на средней ветви закона дисперсии, а начальные плотности диполяритонов на нижней и верхней ветвях закона дисперсии равны друг другу временная эволюция системы представляет собой осциллирующий процесс со временем. При этом амплитуда колебаний монотонно уменьшается из-за эффектов затухания. На больших временах наблюдается экспоненциальное убывание плотностей квазичастиц системы. Колебания плотности диполяритонов накачки первого и второго импульса происходят под фоновым значением начальных плотностей диполяритонов накачки первого и второго импульсов соответственно. При этом плотности диполяритонов накачки и плотности сигнальной и холостой мод на средней ветви закона дисперсии изменяются синфазно. Плотности диполяритонов сигнальной и холостой мод на верхней и нижней ветвях закона дисперсии в начальный момент возрастают за счёт конверсии диполяритонов накачки обоих импульсов. При дальнейшем распространении во времени, разница в начальных плотностях приведет к асимметрии в амплитудах колебаний сигнальной и холостой мод. Мода с большей начальной плотностью будет демонстрировать более выраженные колебания, а также более медленное затухание. Этот эффект обусловлен нелинейным взаимодействием между модами, в котором мода с большей плотностью оказывает доминирующее влияние на динамику всей системы.

#### *Список литературы*

1. Gao T., Eldridge P.S., et al. // Phys. Rev. B. 2012. V. 85. P. 235102.
2. Serafin P., Byrnes T., Kolmakov G.V. // Physics Letters A. 2020. V. 384 (34). P. 126855.

И.В. РЫЖОВ, Г.А. ИВАНОВ

*Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена,  
Санкт-Петербург*

## **АТТОСЕКУНДНОЕ СВЕРХИЗЛУЧЕНИЕ ТРЁХУРОВНЕВЫХ ИОНОВ $\text{Pr}^{3+}$ , СИНТЕЗИРУЕМЫХ В ПЕРОВСКИТОВЫЕ КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ**

Аналитически в полуклассическом приближении рассмотрено сверхизлучение сверхтонкой квантовой точки перовскитовой структуры типа: гетероструктура цирконат – титанат свинца – оксид свинца, легированного активными центрами редкоземельного металла из группы лантаноидов,  $\text{Pr}^{3+}$ , имеющего мультиплетную структуру основного состояния операционных переходов. Сверхизлучение активных центров обладает конфигурацией  $\Lambda$ -схемы с частотами и длинами волн оптических переходов:  $\omega_{31} = 627.44$  ГГц ( $\lambda_{31} = 477.8$  нм),  $\omega_{32} = 500.91$  ГГц ( $\lambda_{32} = 598.5$  нм), находящихся в когерентном состоянии в криогенной камере при температуре 4.2 - 4.5 К. При данных температурах времена сверхизлучения на несколько порядков меньше времён высвечивания при неоднородном уширении спектральной линии и времён дефазировки излучающей подсистемы в целом.

I.V. RYZHOV, G.A. IVANOV

*Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint Petersburg*

## **ATTOSECOND SUPERLUMINESCENCE OF THREE-LEVEL $\text{Pr}^{3+}$ IONS SYNTHESIZED INTO PEROVSKITE QUANTUM DOTS**

Superluminescence of an ultrathin quantum dot with a perovskite-type structure is studied analytically within the semiclassical approximation. The structure considered is a heterostructure of lead zirconate–titanate–lead oxide doped with active centers of a rare-earth metal from the lanthanide group,  $\text{Pr}^{3+}$ , which has a multiplet structure of the ground state for operational transitions. The Superluminescence of the active centers adopts a  $\Lambda$ -scheme configuration, with optical transition frequencies and wavelengths as follows:  $\omega_{31} = 627,44$  GHz ( $\lambda_{31} = 477,8$  nm),  $\omega_{32} = 500,91$  GHz ( $\lambda_{32} = 598,5$  nm). These transitions exist in a coherent state inside a cryogenic chamber at a temperature of 4,2 - 4,5 K. At these temperatures, the superluminescence durations are several orders of magnitude shorter than both: the emission times under inhomogeneous broadening of the spectral line, the dephasing times of the emitting subsystem as a whole.

В настоящее время данные объекты и подобные им полиморфные сверхтонкие образования стали доминировать при исследовании их электрофизических и оптических свойств [1]. Исследования проводились без приближения вращающейся волны (RWA).

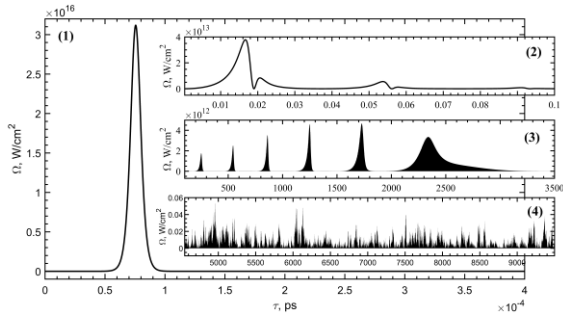


Рис. 1. Первичный импульс сверхизлучения длительностью  $\sim 0.02$  as, мощностью  $W_{\max} \sim 31$  PW/cm<sup>2</sup> и площадью  $S \sim 0.32 \cdot 10^{-3}$  I/cm<sup>2</sup> (1), последующие временные повороты поляризации активной среды Pr<sup>3+</sup> (2), в их многомерном подпространстве это приводит к перекачиванию энергии через верхний возбуждённый уровень между активными и пассивными состояниями, что приводит к длительным звонам, показанным на вставках (3, 4), соответствующих их временам развития

Нами рассмотрен оптический эффект, возникающий в результате когерентного возбуждения ионов Pr<sup>3+</sup> инжектированных в перовскитовую структуру. Мы изучаем сверхизлучение (СИ) сверхтонкой среды в направлении максимума выхода интенсивности СИ. При этом до СИ все сложные диполи были инициированы внешним воздействием линейно поляризованного лазерного света на частоте оптического перехода  ${}^3P_0 - {}^3H_4$ , соответствующего  $\omega_{31} = 627.44$  ГГц. СИ генерировалось на частоте перехода  ${}^3P_0 - {}^3H_6$  [3]. Толщина кристалла не превышает  $0.1$  ( $\lambda_{31}, \lambda_{32}$ ) длин волн излучающих высокочастотных переходов [1, 2]. В этих кристаллах не присутствует волновой эффект распространения вдоль образца как в [3]. Результаты исследования представлены на рис. 1.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РГПУ им. А.И. Герцена (Паспорт № ВН-84).

#### Список литературы

1. Ryzhov I.V., Malikov R.F., Malyshev A.V., Malyshev V.A. // J. Opt. 2021. V. 23. P. 115102.
2. Bogdanov A.A., Ryzhov I.V., et al. // Proc. SPIE. 2001. V. 4605. P. 325.
2. Башаров А.М., Григорян Г.Г. и др. // Квантовая электроника. 2009. Т. 39. № 3. С. 251.

Л.Е. СЕМЕНОВА

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

## **РЕЗОНАНСНОЕ ГИПЕРКОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ НА LO-ФОНОНАХ В КРИСТАЛЛЕ ZnS**

Представлены результаты теоретического анализа запрещённого резонансного гиперкомбинационного рассеяния света на LO-фононах в кристалле ZnS со структурой вюртцита.

L.E. SEMENOVA

*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*

## **RESONANT HYPER-RAMAN SCATTERING BY LO PHONONS IN A ZnS CRYSTAL**

The results of theoretical analysis of forbidden resonant hyper-Raman scattering of light by LO phonons in a ZnS crystal with the wurtzite structure are presented.

Гиперкомбинационное рассеяние (ГКР) света при двухфотонном возбуждении вблизи края поглощения полупроводника позволяет получать информацию не только о колебательной системе, но и механизмах электрон-решётчного взаимодействия и электронных переходах. В связи с этим представляет интерес исследование резонансного ГКР в полупроводниках типа  $A_2B_6$ , имеющих важное практическое значение. В таких соединениях со структурой вюртцита верхняя валентная зона расщеплена на три близко-лежащие подзоны А, В и С, переходы с которых на нижнюю зону проводимости приводят к трем водородоподобным экситонным сериям [1].

При геометрии рассеяния  $y(xxz)x$  резонансное ГКР на продольных оптических (LO) фононах обусловлено запрещённым фрелиховским взаимодействием, и в полупроводниках со структурой вюртцита процесс рассеяния может включать двухфотонные дипольные переходы в  $s$ - и  $d$ -экситоны, относящиеся к В и С сериям. Процесс ГКР, включающий двухфотонные переходы в  $s$ -экситоны, был теоретически исследован в работе [2], и было показано, что в кристалле CdS учёт дипольных переходов в более глубокую валентную зону  $v'$ , которые возможны при смешивании в ней состояний, преобразующихся по неприводимым представлениям группы симметрии  $\Gamma_5$  и  $\Gamma_6$ , в результате

спин-орбитального взаимодействия [3], может привести к дополнительной особенности на частотной зависимости сечения ГКР  $d\sigma/d\Omega$ . Позже было показано, что эти переходы могут оказать влияние на поведение частотной зависимости  $d\sigma/d\Omega$  в кристаллах ZnO [4] и GaN [5].

В представленной работе рассматривается процесс ГКР, включающий переходы как в  $s$ - так и  $d$ -экситоны, в кристалле ZnS. Учитывая известные параметры ZnS [1, 6 - 8], была вычислена зависимость  $d\sigma/d\Omega$  от удвоенной энергии фотонов возбуждающего излучения  $2\hbar\omega_L$  для нескольких значений введенного в работе [3] параметра  $D$ , который зависит от матричных элементов дипольных переходов, и в отсутствие переходов в зону  $v'D = 0$ . Как видно из рис. 1, учёт этих переходов также влияет на поведение частотной зависимости  $d\sigma/d\Omega$ . При  $D = 0$  вклад процесса ГКР, включающего двухфотонные переходы в  $d$ -экситоны, оказывается незначительным, но его роль может заметно измениться в некоторых случаях при  $D \neq 0$  (рис. 2).

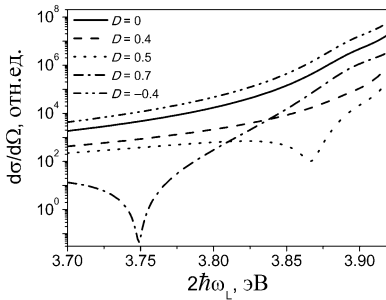


Рис. 1. Сечение ГКР в зависимости от удвоенной энергии фотонов возбуждающего излучения

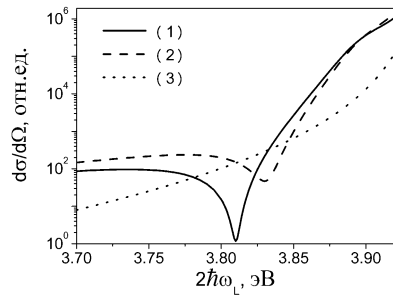


Рис. 2. Сечение ГКР, вычисленное при  $D = 0.6$  (1), а также для процессов рассеяния, включающих двухфотонные переходы в  $s$ - (2) и  $d$ -экситоны (3)

#### Список литературы

1. Соболев В.В. Зоны и экситоны соединений группы  $A^{II}B^{VI}$ . Кишинев: Штиинца, 1980.
2. Semenova L.E. // Laser Phys. 2022. V. 22. P. 084004.
3. Gutsche E., Jahne E. // Phys. Stat. Sol. 1967. V. 19 (2). P. 823.
4. Семенова Л.Е. // Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 15-й Междунар. конф., Минск, Беларусь. 2023. С. 108.
5. Semenova L.E., Maslova Y.Y., Semenov M.A. // Proceed. of 2024 Intern. Conf. Laser Optics. 2024. P. 435.
6. Kobayashi A., Sankey O.F., et al. // Phys. Rev. B. 1983. V. 28. P. 935.
7. Cardona M. // J. Phys. Chem. Solids. 1963. V. 24. P. 1543.
8. Sobolev V.Val., Sobolev V.V. // Rus. Phys. J. 2003. V. 46 (10). P. 1042.

А.Д. КОТОВА<sup>1</sup>, А. ИСМАИЛ<sup>1,2</sup>, И.О. ОРЕХОВ<sup>1</sup>, С.Г. САЗОНКИН<sup>1</sup>,  
А.Ю. ФЕДОРЕНКО<sup>1</sup>, Д.А. ДВОРЕЦКИЙ<sup>1</sup>, В.Е. КАРАСИК<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГЕНЕРАЦИИ КОГЕРЕНТНОГО СУПЕРКОНТИНУУМА НА ОСНОВЕ СОЛИТОННЫХ МОЛЕКУЛ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА

В работе представлено экспериментальное исследование когерентной генерации суперконтинуума с использованием солитонных молекул в полностью волоконном эрбиевом усилителе. Получен широкий спектр с гребенчатой структурой, охватывающий диапазон длин волн 1400 - 1700 нм, без расщепления импульса (10 импульсов сохраняют когерентность во временной области при увеличении длительности импульса до 1,129 пс и постоянстве временного промежутка между импульсами), реализованный без использования высоконелинейных волокон (HNLF), и с низким относительным уровнем шума, составляющим 0,0108 %, в диапазоне 10 кГц – 1 МГц. Полученные результаты демонстрируют перспективность солитонных молекул в качестве подхода для оптической частотной гребенчатой спектроскопии и для расширения спектра в потенциальных установках интерферометрии  $f - 2f$ .

A.D. KOTOVA<sup>1</sup>, A. ISMAEEL<sup>1,2</sup>, I.O. OREKHOV<sup>1</sup>, S.G. SAZONKIN<sup>1</sup>,  
A.Yu. FEDORENKO<sup>1</sup>, D.A. DVORETSKIY<sup>1</sup>, V.E. KARASIK<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

## COHERENT SUPERCONTINUUM GENERATION BY THE HIGH-ORDER SOLITON MOLECULES

An experimental study on the coherent supercontinuum generation by soliton molecules in an erbium-doped all-fiber amplifier is reported. A broadband spectrum with a comb-teeth structure spanning 1400 to 1700 nm was achieved without pulse fission (10 pulses remain coherently in time domain with increased pulse duration up to 1.129 ps and without changing in the time separation between pulses), obtained without the use of high-nonlinearity fibers (HNLFs), and with low relative intensity noise of 0.0108 % in the range of 10 kHz – 1 MHz. This result highlights soliton molecules as a promising test bed for optical frequency comb spectroscopy and for spectral broadening in prospective  $f - 2f$  interferometry setups.



Генерация суперконтинуума (СК) на сегодняшний день является основным способом расширения спектра частотных гребёнок за счёт нелинейного уширения спектра. Стандартные подходы к генерации СК основаны на распространении ультракоротких импульсов по волокнам с высокой нелинейностью. Однако такие схемы ограничены явлением распада солитонов, а также сложностью изготовления волокон и высокими затратами [1].

В данной работе использована схема с волоконным эрбиевым кольцевым лазером с синхронизацией мод на основе механизма нелинейной эволюции поляризации (рис. 1). В качестве активной среды применялось специально разработанное эрбиевое волокно с заданными параметрами дисперсии и нелинейности [2].

Был реализован устойчивый режим усиления СК с десятью импульсами: длительность импульса увеличилась с 509 фс до 1,129 пс, при этом сохранялась когерентность и постоянство временных интервалов между импульсами. Получен широкий оптический спектр с гребенчатой структурой в диапазоне 1400 - 1700 нм без распада импульсов.

Впервые показано, что когерентная генерация суперконтинуума на основе солитонных молекул высокого порядка в полностью волоконных эрбиевых усилителях позволяет избежать распада импульсов и необходимости применения волокон с высокой нелинейностью (рис. 2). Полученные источники демонстрируют высокую стабильность, широкий спектральный диапазон, и открывают перспективы практического использования в спектроскопии и интерферометрии.

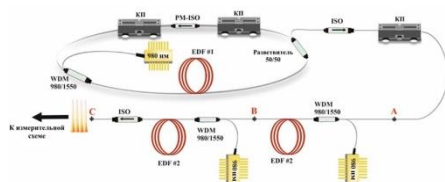


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

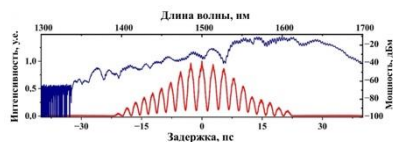


Рис. 2. Спектр и автокорреляция интенсивности выходного излучения после усиления

#### Список литературы

1. Ismaeel A., Krylov A. // Optics Letters. 2024. V. 49. P. 5977-5980.
2. Ismaeel A., Orekhov I., et al. // Optics & Laser Technology. 2025. V. 188. P. 112913.

Л.Е. СЕМЕНОВА

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

**ДВУХФОНОННОЕ РЕЗОНАНСНОЕ  
КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА  
В КРИСТАЛЛЕ CdSe**

В работе представлены результаты теоретического исследования резонансного комбинационного рассеяния света на 2LO-фононах в кристалле CdSe со структурой вюртцита.

L.E. SEMENOVA

*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*

**TWO-PHONON RESONANT RAMAN SCATTERING OF LIGHT  
IN A CdSe CRYSTAL**

The paper presents the results of theoretical study of resonant Raman scattering of light by 2LO phonons in a CdSe crystal with the wurtzite structure.

Одним из методов исследования полупроводников является спектроскопия резонансного комбинационного рассеяния (РКР) света. Особый интерес представляет двухфононное РКР, поскольку в этом случае в процессе рассеяния участвуют фононы с различными волновыми векторами. Об экспериментальных исследованиях РКР второго порядка в полупроводниках  $A_2B_6$  сообщалось в ряде работ [1, 2]. Была предложена теоретическая модель РКР на 2LO-фононах, рассматривающая в качестве промежуточных состояний экситоны Ванье [3]. С применением метода функции Грина были получены выражения, позволяющие вычислять сечение рассеяния при возбуждении ниже экситонных уровней [4, 5]. Матричный элемент перехода между экситонными состояниями вследствие внутризонного фрелиховского взаимодействия зависит от эффективных масс электрона и дырки [3 - 5], которые в полупроводниках  $A_2B_6$  со структурой вюртцита зависят от направления. Но в работах [3 - 5] рассматривались их скалярные величины.

В представленной работе была рассчитана частотная зависимость сечения РКР на 2LO-фононах  $d\sigma/d\Omega$  в вюртцитном полупроводнике CdSe с учётом анизотропии эффективных масс при возбуждении ниже экситонных уровней для геометрии рассеяния, при которой возбуждающее

излучение и рассеянный свет поляризованы вдоль оптической оси. В этом случае в процессе рассеяния участвуют В и С экситоны. В расчётах учитывались вклады последовательностей промежуточных экситонных состояний  $s$ - $s$ - $s$  и  $s$ - $p$ - $s$ . При вычислении были использованы следующие параметры кристалла CdSe: ширина запрещённой зоны 1.8571 эВ и 2.272 эВ для В и С серий, экситонный ридберг 0.0161 эВ [6] и  $\hbar\omega_{LO} = 0.027$  эВ, где  $\omega_{LO}$  – частота LO-фонона [7]. При этом учитывались эффективные массы электрона и дырок в подзонах В и С, данные в работах [8, 9].

Результаты представлены на рис. 1, где также показаны относительные вклады в сечение рассеяния последовательностей промежуточных состояний  $s$ - $s$ - $s$  и  $s$ - $p$ - $s$ . Для сравнения были проведены расчёты сечения рассеяния  $d\sigma_{ap}/d\Omega$  для «усреднённых» значений эффективных масс. Как видно из рис. 1, в рассматриваемом случае учёт анизотропии эффективных масс не ведёт заметному изменению сечения рассеяния в CdSe.

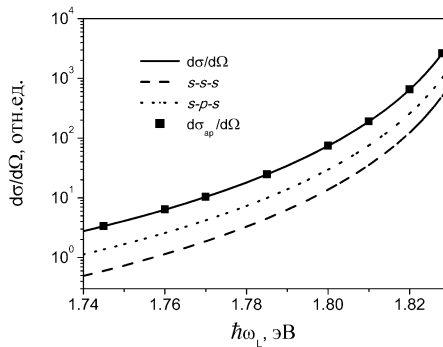


Рис. 1. Сечение РКР на 2LO-фононах в зависимости от энергии фотона возбуждающего излучения

#### Список литературы

1. Oka Y., Kushida T. // J. Phys. Soc. Jpn. 1972. V. 33 (5). P. 1372.
2. Verma P., Anand S., Jain K.P. // Physica B. 1999. V. 271. P. 1.
3. Garcia-Cristobal A., Cantarero A., Trallero-Giner C., Cardona M. // Phys. Rev. B. 1994. V. 49 (19). P. 13430.
4. Semenova L.E., Prokhorov K.A. // J. Raman Spectrosc. 2001. V. 32 (11). P. 942.
5. Семенова Л.Е., Прохоров К.А. // ЖЭТФ. 2001. Т. 119 (5). С. 886.
6. Соболев В.В. Зоны и экситоны соединений группы  $A^{II}B^{VI}$ . Кишинев: Штиинца, 1980.
7. Физические величины: Справочник. Москва: Энергоатомиздат, 1991.
8. Капустина А.Б., Петров Б.В., Родина А.В., Сейсян Р.П. // ФТТ. 2000. Т. 42 (7). С. 1207.
9. Horley P.P., Gorley V.V., et al. // Thin Solid Films. 2005. V. 480-481. P. 373.

Цз. У, Ч. ЛИ, А.М. СМІРНОВ, Ю. ИНЬ<sup>1</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*<sup>1</sup>*Парижский политехнический университет, Палезо, Франция***САМОСОГЛАСОВАННАЯ НЕЛИНЕЙНОСТЬ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА В КОМПОЗИТАХ CdSe/ZnS–MOF**

Представлена компактная самосогласованная модель для расчёта нелинейной восприимчивости третьего порядка  $\chi^3$  и коэффициентов  $n_2$ ,  $\beta$  в композитах CdSe/ZnS–MOF без подгонки параметров. Показано, как размер ядра, толщина оболочки и эффективная среда совместно управляют спектрами  $\chi_{\text{eff}}^{(3)}(\lambda)$ , что делает модель удобным инструментом для проектирования нелинейно-оптических материалов.

JINGXU WU, CHENJIA LI, A.M. SMIRNOV, YUWEI YIN<sup>1</sup>*Lomonosov Moscow State University*<sup>1</sup>*Polytechnic Institute of Paris, Palaiseau, France***SELF-CONSISTENT THIRD-ORDER NONLINEARITY IN CdSe/ZnS–MOF COMPOSITES**

We present a compact self-consistent model for calculating the third-order nonlinear susceptibility  $\chi^3$  and the Kerr and absorption coefficients  $n_2$  and  $\beta$  in CdSe/ZnS–MOF composites without empirical fitting. The results show how core size, shell thickness, and effective-medium environment jointly control the spectra of  $\chi_{\text{eff}}^{(3)}(\lambda)$ , making the model a practical tool for designing nonlinear optical materials.

Мы предлагаем компактную теоретическую модель для расчёта нелинейной восприимчивости третьего порядка  $\chi^3$  квантовых точек CdSe/ZnS, встроенных в матрицу MOF, и для прямого получения коэффициентов Керра  $n_2$  и нелинейного поглощения  $\beta$  без подгонки параметров. На микроуровне электроны и дырки в ядре CdSe с оболочкой ZnS описываются в конечной сферической яме (модель эффективной массы). При уменьшении радиуса ядра  $R$  ( $\approx 2.5 - 4$  нм) мы получаем квантоворазмерный сдвиг ширины запрещённой зоны  $E_g$  примерно на 0.3 эВ. Рис. 1 показывает зависимость  $E_g$  от размера ядра и толщины оболочки.

Нелинейный отклик одной квантовой точки описывается трёхуровневой схемой (основное состояние, яркий экситон, более высокий уровень) в формализме матрицы плотности. Разложение по полю

до третьего порядка даёт  $\chi^3(\omega)$  с учётом релаксации, уширения и разброса размеров. Затем квантовые точки рассматриваются как субволновые включения с объёмной долей  $\phi$  в диэлектрической матрице MOF. Используя модель Максвелла–Гарнетта, мы получаем эффективную диэлектрическую функцию и локальный полевой множитель  $L(\omega)$ , так что эффективная нелинейность композита имеет вид  $\chi_{\text{eff}}^{(3)} \approx \phi |L|^4 \chi^3_{\text{dot}}$ .

Для типичных параметров ( $R \approx 3$  нм,  $\phi \approx 0.15$ ,  $\lambda = 0.9 - 1.4$  мкм) модель предсказывает  $|\chi_{\text{eff}}^{(3)}|$  порядка  $10^{-22}$  м<sup>2</sup>/В<sup>2</sup>, отрицательный  $n_2 \sim 10^{-20}$  м<sup>2</sup>/Вт (саморазфокусировка) и рост  $\beta$  до  $\sim 10^{-13}$  м/Вт к длинным волнам. Эти значения сопоставимы с данными Z-scan для CdSe/ZnS в диэлектрических матрицах. Рис. 2 иллюстрирует спектры  $\chi_{\text{eff}}^{(3)}(\lambda)$ ,  $n_2(\lambda)$  и  $\beta(\lambda)$ . Модель показывает, как размер ядра, оболочка, матрица и заполнение  $\phi$  совместно управляют нелинейными параметрами и может использоваться для быстрого подбора композиций перед экспериментом.

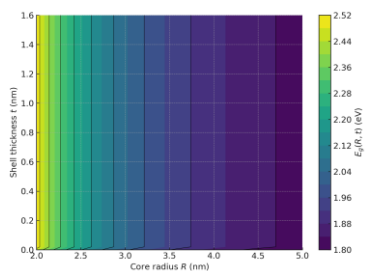


Рис. 1. Карта конфайнмент-усиленной ширины запрещённой зоны  $E_g(R, t)$  для квантовой точки CdSe/ZnS–MOF

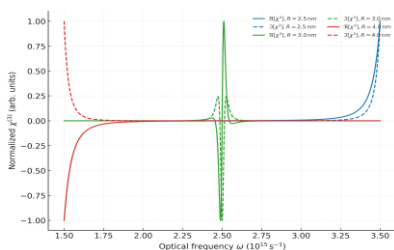


Рис. 2. Спектры эффективной нелинейности  $\chi_{\text{eff}}^{(3)}(\lambda)$ , а также соответствующих коэффициентов  $n_2(\lambda)$  и  $\beta(\lambda)$

#### Список литературы

1. Lv W., Wang X., et al. // Nano Convergence. 2023. V. 10. P. 39.
2. Acuña-Yeomans E., Yavuz C.T., et al. // J. Mater. Chem. A. 2024. V. 12. P. 23319-23331.
3. Wu J., Yang Y., Shi J., Yin Y., He Y., Li C. // arXiv:2511.02684. 2025.
4. Luo R., Gao Y., et al. // Appl. Opt. 1997. V. 36. P. 8153-8161.
5. Bruggeman D.A.G. // Ann. Phys. 1935. V. 416. P. 636-664.
6. Hao J., Chen L., et al. // Sci. Rep. 2019. V. 9. P. 11679.

**А.Р. БАГРОВ**

*Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева*

## **ДИНАМИКА ПЕРЕПУТЫВАНИЯ ТРЁХ АТОМОВ ДЖЕЙНСА–КАММИНГСА**

В данной работе мы проводим подробный анализ динамики теплового перепутывания трёх двухуровневых атомов, запертых в независимые резонаторы и резонансно взаимодействующих с соответствующей модой квантованного поля резонатора. Результаты компьютерного моделирования показывают, что модель крайне чувствительна по отношению к разрушительному действию тепловых полей резонаторов.

**A.R. BAGROV**

*Samara National Research University*

## **DYNAMICS OF ENTANGLEMENT OF THREE JAYNES–CUMMINGS ATOMS**

In this paper, we perform a detailed analysis of the dynamics of thermal entanglement of three two-level atoms trapped in independent resonators and resonantly interacting with the corresponding mode of the resonator's quantized field. The results of the computer simulation show that the model is extremely sensitive to the destructive effect of the thermal fields of the resonators.

Исследования многочастичных перепутанных состояний, или нелокальных квантовых корреляций между двумя и более квантовыми подсистемами, являются одной из приоритетных задач квантовой информатики [1, 2]. Для функционирования квантовых технологий, включая квантовые компьютеры и квантовые сети, критически важны перепутанные состояния естественных либо искусственных двухуровневых атомов (кубитов) [3]. Изучение наиболее эффективных схем генерации, механизмов управления и контроля перепутанных состояний кубитов является, таким образом, одной из основных задач квантовой информатики. Для генерации перепутанных состояний обычно используют взаимодействие естественных или искусственных атомов (нейтральных ридберговских атомов и ионов в ловушках, примесных спинов, квантовых точек, сверхпроводящих цепей, гибридных и оптомеханических систем) с электромагнитными полями резонаторов [4]. Для теоретического исследования динамики перепутывания состояний

кубитов в высокодобротных резонаторах используют различные точно разрешимые обобщения модели Джейнса–Каммингса [5]. Хотя общие свойства многокубитных перепутанных состояний изучены достаточно подробно, количественные критерии перепутывания удалось строго ввести только для двухкубитных систем. Анализ динамики перепутывания трёх двухуровневых атомов в данной работе проводился с использованием степени совпадения [6], анализ же парного перепутывания – с помощью критерия Переса-Хородецких или критерия отрицательности [7].

Целью работы является подробное теоретическое исследование различных параметров перепутывания для трёхкубитной модели, в которой атомы заперты в три независимых одномодовых идеальных резонаторах и резонансно взаимодействуют с выделенной модой соответствующего резонатора посредством однофотонных процессов.

Для исследуемой модели было решено нестационарное уравнение Шредингера в случае фоковских состояний полей резонаторов и квантовое уравнение Лиувилля в случае тепловых состояний полей резонаторов. Результаты компьютерного моделирования временной зависимости степени совпадения и критерия отрицательности показали, что динамика перепутывания для различных начальных состояний кубитов существенно сильнее зависит от интенсивностей тепловых резонаторов, чем в исследуемых ранее трёхкубитных моделях [5]. В модели также наблюдается эффект мгновенной смерти парного перепутывания даже в случае относительно слабых тепловых полей резонаторов, что принципиально отличается от двухкубитных моделей.

#### *Список литературы*

1. Kendon V.M., Nemoto D., Munro W.J. // J. Mod. Opt. 2002. V. 49 (10). P. 1709-1716.
2. Wendin G. // Rep. Prog. Phys. 2017. V. 80 (10). P. 106001.
3. Chen J. // J. Phys. Conf. Ser. 2021. V. 1865. P. 022008.
4. Gu X., et al. // Phys. Rep. 2017. V. 718-719. P. 1-102.
5. Bagrov A.R., Bashkurov E.K. // Quantum Inf. Process. 2025. V. 24 (5). P. 154.
6. Jozsa R. // J. Mod. Opt. 1994. V. 41. P. 1758-1775.
7. Peres A. // Phys. Rev. Lett. 1996. V. 77. P. 1413-1415.

С.А. АСТАШКЕВИЧ

*Санкт-Петербургский государственный университет*

## **ЗАВИСИМОСТЬ ИОННОГО СОСТАВА ЦЕЗИЙСОДЕРЖАЩЕЙ ФОТОПЛАЗМЫ ОТ ЕЁ УСЛОВИЙ**

В рамках развитой нами модели определены зависимости парциальных частей концентрации ионов  $\text{Cs}^+$  и  $\text{Cs}_2^+$  в стационарной пространственно квазиоднородной Cs и Cs–Ar фотоплазме при различных условиях в газовой ячейке. Установлено, что эти зависимости от скорости резонансного возбуждения и давлений паров Cs и буферного газа существенно не монотонные. Найдены параметры фотоплазмы, при которых она состоит почти полностью из  $\text{Cs}^+$  и  $\text{Cs}_2^+$  ионов, соответственно.

S.A. ASTASHKEVICH

*Saint Petersburg State University*

## **DEPENDENCE OF IONIC COMPOSITION OF CESIUM CONTAINING PHOTOPLASMA ON ITS CONDITIONS**

Dependencies of the fractions of  $\text{Cs}^+$  and  $\text{Cs}_2^+$  ion densities in stationary spatially quasi-homogeneous Cs and Cs–Ar photoplasma under various conditions in a gas cell are determined within the framework of a model developed by us. It is established that these dependencies on the rate of resonant excitation and the Cs vapor and buffer gas pressures are substantially non-monotonic. The parameters of the photoplasma are found, at which it consists almost entirely of  $\text{Cs}^+$  and  $\text{Cs}_2^+$  ions, respectively.

Процессы хемоионизации играют важнейшую роль в создании фотоплазмы в парах щелочных металлов [1, 2]. Пеннинговская ионизация приводит к появлению атомарных ионов, а ассоциативная ионизация – молекулярных ионов. Цель настоящей работы состояла в исследовании ионного состава цезийсодержащей фотоплазмы при различных скоростях резонансного возбуждения и давлениях паров цезия и буферного газа.

Рассмотрена стационарная пространственно однородная фотоплазма в цилиндрической ячейке, содержащей пары цезия и буферного газа, возбуждаемая неким внешним источником спектрально однородного излучения в области D1 и D2 линий Cs. Развита нами модель включала 6S, 6P, 5D и 6D состояния атомов Cs,  $\text{Cs}^+$  и  $\text{Cs}_2^+$  ионы и электроны. Учитывалась пеннинговская ионизация резонансных 6P состояний и ассоциативная ионизация 6P и 5D состояний, а также ступенчатая ионизация, диссоциативная рекомбинация и амбиполярная диффузия зарядов. Перенос резонансного излучения с учётом столкновительного



уширения D1 и D2 линий Cs был выполнен в приближении Бибермана–Холстейна. Параметры фотоплазмы определялись в результате решения системы уравнений баланса заселённости компонент фотоплазмы и энергии электронов методом итераций.

В качестве иллюстрации, на рис. 1 приведены результаты для цилиндрической ячейки радиуса  $R = 0.5$  см и длины  $L = 4R$ . Видно, что зависимости доли ионов  $\text{Cs}_2^+$  от скорости резонансного возбуждения для чистой цезиевой фотоплазмы (рис. 1а) и от давления паров Cs для Cs–Ar фотоплазмы при  $b = P_{\text{Ar}}/P_{\text{Cs}} = 0, 10^2$  и  $10^3$  при спектральной плотности резонансной накачки  $F = 40 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{нм}^{-1}$  (рис. 1б) являются существенно немонокотными. Фотоплазма состоит почти полностью из атомных ионов Cs при  $P_{\text{Cs}} > 0.01$  торр, тогда как при  $P_{\text{Cs}} \sim 10^{-3}$  торр и  $P_{\text{Ar}} \geq 1$  торр состоит почти полностью из молекулярных ионов Cs. Причина этого в том, что относительное влияние пеннинговской и ступенчатой ионизации, включающей высоко возбуждённые 6D состояния, возрастает с увеличением скорости резонансного возбуждения (и, соответственно, плотности резонансной накачки и давления Cs), тогда как ассоциативная ионизация, включающая менее возбуждённые 6P и 5D состояния, более эффективна при более низких скоростях резонансного возбуждения.

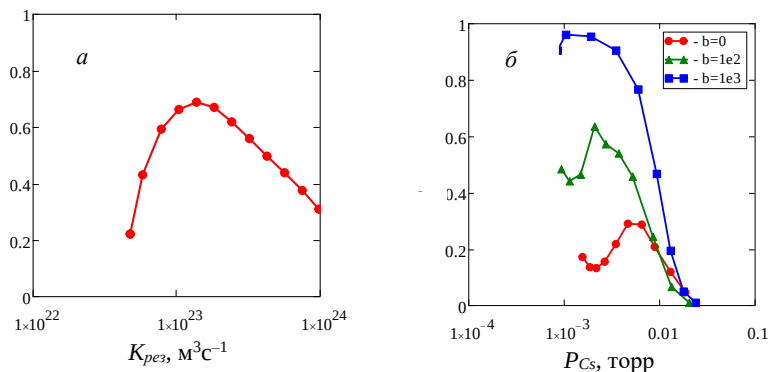


Рис. 1. Зависимости доли ионов  $\text{Cs}_2^+$  в газовой ячейке от скорости резонансного возбуждения для Cs–фотоплазмы (а) и от давления паров Cs для Cs–Ar фотоплазмы при  $b = P_{\text{Ar}}/P_{\text{Cs}} = 0, 10^2$  и  $10^3$  (б)

Полученные результаты представляют интерес для проектирования источников ионов на основе щёлочносодержащей фотоплазмы.

#### Список литературы

1. Ключарев А.Н., Безуглов Н.Н., Стасевич Т. // Опт. спектр. Т. 77. № 3. С. 342–368.
2. Astashkevich S.A., Kudryavtsev A.A. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2024. V. 313. P. 108826.

С.А. АСТАШКЕВИЧ

*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ФОТОПЛАЗМЫ В ПАРАХ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ**

Используя развитую нами модель, исследована радиальная неоднородность Na–Ar и Cs–Ar фотоплазмы в цилиндрической ячейке. Установлено, что эта неоднородность возрастает при увеличении давления компонент газовой смеси. Это связано, в первую очередь, с увеличением концентрации электронов и соответствующим возрастанием частоты тушения резонансных уровней электронными ударами.

S.A. ASTASHKEVICH

*Saint Petersburg State University*

## **INVESTIGATION OF SPATIAL NON-HOMOGENEITY OF PHOTOPLASMA IN ALKALI METAL VAPORS**

The radial non-homogeneity of Na–Ar and Cs–Ar photoplasmas in a cylindrical cell is investigated, using the model developed by us. It was established that this non-homogeneity increases with increasing pressure of the gas mixture components. This is mainly due to an increase in the electron density and a corresponding increase in the frequency of quenching of resonance levels by electrons.

В общем виде задача определения пространственного распределения резонансных уровней в фотоплазме не может быть решена теоретически и решается численно, используя некоторые упрощённые модели. В работах [1, 2] нами была развита модель стационарной резонансной фотоплазмы в смеси паров щелочных металлов и буферного газа. Эта модель рассматривала резонансные и высоковозбуждённые состояния атомов щелочного металла, процессы хемоионизации и ступенчатой ионизации, диссоциативной и ударно-столкновительной рекомбинации, перенос резонансного излучения в приближении Бибермана – Холстейна и амбиполярную диффузию электронов, одно- и двухатомных ионов щелочных металлов. Данная модель была использована для исследования Na–Ar и Cs–Ar фотоплазмы в цилиндрической ячейке радиуса  $R = 5 \cdot 10^{-3}$  м и длины  $L = 2 \cdot 10^{-2}$  м. Плотность оптической накачки этой ячейки составляла  $F = 40$  Вт/(м<sup>2</sup>·нм) и была постоянной в области D1 и D2 линий. Газовая температура была 680 К для Na–Ar и 480 К для Cs–Ar смеси. В

приближении квазиоднородной фотоплазмы [2] были определены эффективная вероятность резонансного излучения  $A$  и частота тушения резонансных уровней  $f_q$  для различных давлений компонент газовых смесей. Используя эти данные, было определено отношение  $N_R/N_0$  концентрации атомов щелочных металлов на оси и в пристеночной области цилиндрической ячейки, используя формулу [3]:

$$N_R/N_0 = \left[ 1 + s \cdot (f_q/A) \right]^{-1}. \quad (1)$$

Для контура Фойгта мы использовали значение  $s = 0.9$  [2]. Получены данные о радиальной неоднородности концентраций  $^2P_{3/2}$  резонансных уровней Na (рис. 1а) и Cs (рис. 1б). Пространственная неоднородность возрастает с увеличением давления компонент газовой смеси. Основная причина этого в увеличении концентрации электронов и частоты тушения резонансных уровней при увеличении давления паров щелочных металлов (приводящего к увеличению скорости резонансного возбуждения) и буферного газа (приводящего к увеличению времени амбиполярной диффузии и накоплению зарядов в объёме фотоплазмы). Минимальным значениям отношения  $N_R/N_0$ , равным 0.39 (Na–Ar) (рис. 1а) и 0.20 (Cs–Ar) (рис. 1б), соответствует концентрация электронов  $2.2 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ .

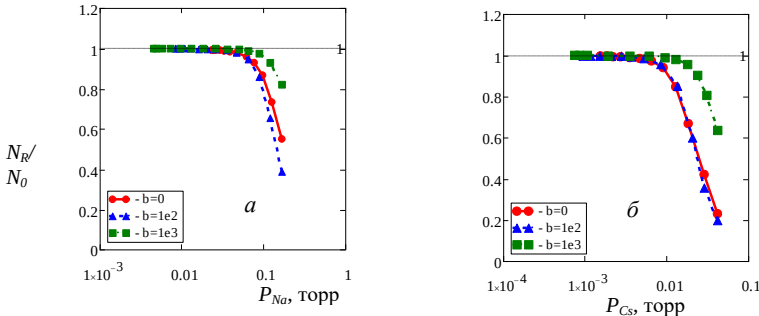


Рис. 1. Зависимости отношения  $N_R/N_0$  для резонансных  $^2P_{3/2}$  уровней Na (а) и Cs (б) от давления паров щелочного металла в цилиндрической ячейке для различных отношений давления компонент газовой смеси  $b = P_{Ar}/P_{Na(Cs)} = 0, 10^2$  и  $10^3$

Полученные результаты представляют интерес для использования в различных приложениях щелочносодержащей фотоплазмы.

#### Список литературы

1. Astashkevich S.A., Kudryavtsev A.A. // Phys. Plasmas. 2019. V. 26. № 10. P. 103509.
2. Astashkevich S.A., Kudryavtsev A.A. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2024. V. 313. P. 108826.
3. Ключарев А.Н., Безуглов Н.Н. Процессы возбуждения и ионизации атомов при поглощении света. Л.: Изд-во ЛГУ, 1983.

Ч. ЛИ<sup>1,2</sup>, Т.С. ТЕБЕНЕВА<sup>1</sup>, В.Е. ЛОБАНОВ<sup>1</sup>,  
Д.А. ЧЕРМОШЕНЦЕВ<sup>1,3</sup>, И.А. БИЛЕНКО<sup>1,2</sup>, А.Е. ШИТИКОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Российский квантовый центр, Сколково*

<sup>2</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

<sup>3</sup>*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный*

## **ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ РЕЖИМОВ ГЕНЕРАЦИИ ПЛАТИКОНОВ В ВЫСОКОДОБОТНОМ $\text{Si}_3\text{N}_4$ МИКРОРЕЗОНАТОРЕ В РЕЖИМЕ ЗАТЯГИВАНИЯ**

В работе рассматривается генерация платиконов в оптических микрорезонаторах из  $\text{Si}_3\text{N}_4$  режиме затягивания частоты диодного лазера. При изменении расстояния между чипом из  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и лазером мы наблюдаем несколько различных режимов генерации платиконов.

CHENGCONG LI<sup>1,2</sup>, T.C. TEBENEVA<sup>1</sup>, V.E. LOBANOV<sup>1</sup>,  
D.A. CHERMOSHENTSEV<sup>1,3</sup>, I.A. BILENKO<sup>1,2</sup>, A.E. SHITIKOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Russian Quantum Centre, Skolkovo*

<sup>2</sup>*Lomonosov Moscow State University*

<sup>3</sup>*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny*

## **PLATICON STATE SWITCHING IN HIGH-Q $\text{Si}_3\text{N}_4$ MICRORESONATOR IN SELF-INJECTION LOCKING REGIME**

Based on self-injection locking in a high-Q factor  $\text{Si}_3\text{N}_4$  microresonator (MRR), by changing the distance between DFB laser and the photonic chip with MRR, we observe several platicon states.

С развитием интегрированной фотоники керровские оптические частотные гребёнки в микрорезонаторах (МРР) из нитрида кремния стали незаменимым инструментом передовых технологий. Микрогребёнки являются простым и эффективным способом генерации микроволнового сигнала с высокой стабильностью и чистотой частот [1]. Использование эффекта затягивания [2] позволяет уменьшить размер установки до нескольких сантиметров. Затягивание частоты лазера без изолятора частотой высокودобротного МРР является простым и надежным способом стабилизации частоты лазера.

Экспериментальная установка представлена на рис. 1а, b. Лазер с распределённой обратной связью (ЛД) подключен встык к фотонному

чипу. Выходной оптический сигнал собирается линзовым волокном и делится на три части. Одна часть выходного сигнала подключена к оптическому спектральному анализатору (ОСА). Вторая часть сигнала подключается к быстродействующему фотоприёмнику и электрическому спектральному анализатору (ЭСА), а последняя часть отправляется на фотоприёмник и осциллограф (ОСЦ). Мы медленно сканируем частоту лазера, изменяя его рабочий ток в пределах собственной частоты MPP. Когда мода MPP возбуждается из-за шероховатости поверхности MPP, происходит рэлеевское рассеяние, и часть света отражается в лазер, что приводит к затягиванию частоты лазера. Мы также используем пьезоконтроллер для плавного изменения фазы затягивания, регулируя расстояние между лазером и фотонным чипом. Проводя эксперимент, мы увеличивали ток лазера (от 410 до 435 мА) и получили стабильный спектр микрогребёнки, когда ток был настроен приблизительно на 420 мА. Спектр соответствует платикону, он представлен на рис. 1d. На быстром фотоприёмнике, мы получили высокостабильный микроволновый сигнал биений на частоте 21.36 ГГц. При аппроксимации микроволнового сигнала профилем Фойгта лоренцевская часть аппроксимации составляет 21 Гц (рис. 1c). Изменяя расстояние между лазером и фотонной микросхемой, мы наблюдаем ещё два состояния платиконов (рис. 1e, f).

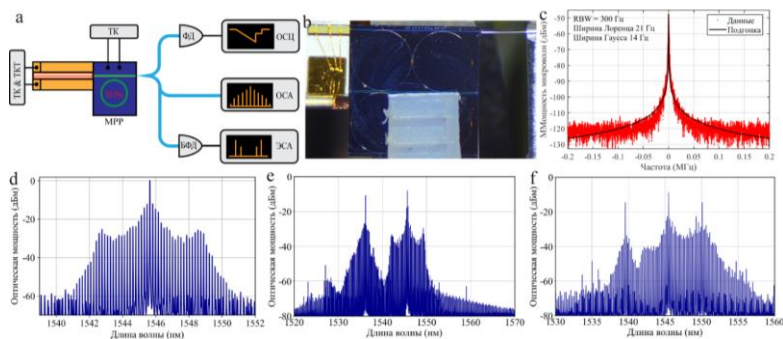


Рис. 1. Экспериментальная установка: схема (a). фотография (b), микроволновый сигнал биений платиконной гребёнки (c), различные состояния платиконов (d - f)

В заключение, мы можем получить различные состояния платиконов, изменяя расстояние между лазером и фотонной микросхемой с MPP в режиме затягивания частоты лазера частотой MPP.

#### Список литературы

1. Sun W, Chen Z, et al. // Light: Science & Applications. 2025. V. 14. P. 179.
2. Kondratiev N.M., et al. // Frontiers of Physics. 2023. V. 18. P. 21305.

И.В. МИНИН, О.В. МИНИН

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет*

## **ФОТОННЫЙ КРЮЧОК НА ОСНОВЕ ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННО НАРУШЕННЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СИММЕТРИЙ ЧАСТИЦЫ МУХАЛИНГА**

В работе предложен новый метод формирования фотонного крючка на основе частиц Мухалинга. В отличие от Янус-частиц, частицы Мухалинга имеют не две, а несколько целенаправленно нарушенных симметрий. Применение таких частиц открывает новые возможности в мезотронике.

I.V. MININ, O.V. MININ

*National Research Tomsk Polytechnic University*

## **PHOTONIC HOOK BASED ON PURPOSEFULLY VIOLATED SPATIAL SYMMETRIES OF THE MUKHALING PARTICLE**

The report proposes a new method for forming a photonic hook based on Mukhaling particles. Unlike Janus particles, Mukhaling particles have not two, but several deliberately broken symmetries. The use of such particles opens up new possibilities in mesotronics.

Микроскопия, основанная на мезомасштабных частицах, зарекомендовала себя как перспективный инструмент для преодоления дифракционного предела. В то же время, низкий контраст изображения может быть преодолен с помощью косо́го освещения с помощью так называемого фотонного крючка (ФК), открытого в 2015 г [1, 2]. ФК – новый тип искусственно созданного искривленного локализованного пучка ближнего поля с радиусом кривизны меньше длины волны. Принцип действия основан на комбинации эффектов интерференции волн и разности фазовых скоростей [2, 3]. До сих пор для формирования ФК использовались Янус-частицы [3]. На рис. 1 показана конфигурация локализация поля для новой, ранее не известной конфигурации – частица, представляющая комбинацию призмы и кубоида при её облучении со стороны меньшей плоской поверхности, а не со стороны вершины призмы как в [1, 2]. В этом плане, такая мезоразмерная частица может рассматриваться как частица Мухалинга – в буддизме Будда с четырьмя лицами или в индуизме Мухалинг – имеющего более одного лица, обычно до пяти [4].

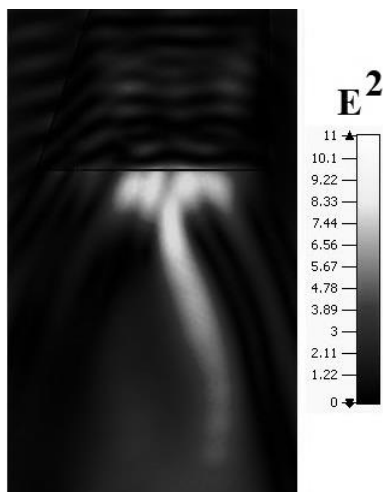


Рис. 1. Пример структурированного субволнового поля при облучении частицы Мухалинга, состоящей из комбинации призмы и кубоида, со стороны малого плоского основания

Как показали исследования, новая конфигурация формирования ФК позволяет решить проблему размещения частицы на подложке [5]. Концепция фотонного крючка предлагает прецезионный контроль над движением частицы для манипулирования и сортировки клеток на платформах "лаборатория-на-чипе", для *in vitro* применений – выборочно направлять клетки по изогнутой траектории для последующей их дифференциации [6], а также для транспорта нанообъектов в межклеточной или внутриклеточной среде по искривленной траектории, для доставки нанолечарств через барьеры центральной нервной системы, наноструктурирования поверхностей [7], микроскопии, новых фотонных устройствах мезотроники и других областях.

#### References

1. Minin I.V., Minin O.V. // Patent of Russia 161207 (27 October, 2015).
2. Minin I.V., Minin O.V. // J of Biomedical Photonics & Eng. 2020. V. 6(2). P. 020301.
3. Minin O.V., Minin I.V. The Photonic Hook: From Optics to Acoustics and Plasmonics. 2021. Springer, Cham.
4. Rao T.A. Motilal Banarsidass Publisher. 1985. P. 97.
5. Ang A., et al. // Proc. META 2018, the 9th Int. Conf. on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics. France, 2018
6. Chen W.-Y., et al. // Opt Las Tech. 2025. V. 180. P. 111520.
7. Minin I.V., Minin O.V. // JEPT Letters. 2024. V. 120 (2). P. 146-150.

И.О. КУЗНЕЦОВ, П.Ф. КАРЦЕВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **МОДЕЛЬ РЕЛАКСАЦИИ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО СОСТОЯНИЯ ПОСЛЕ ИМПУЛЬСНОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ С УЧЁТОМ НЕРАВНОВЕСНЫХ ФОНОНОВ**

Представлена модель для описания релаксации сверхпроводящего состояния после воздействия ультракороткого оптического импульса, учитывающая неравновесность фононной подсистемы. В основе модели лежат уравнения Боголюбова–де Жена для сверхпроводящего состояния и квантовое уравнение Лиувилля для редуцированных матриц плотности. При помощи численного моделирования исследовано влияние температуры и энергии возбуждающего импульса на характерные времена процессов.

I.O. KUZNETSOV, P.F. KARTSEV

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

## **MODEL OF SUPERCONDUCTING STATE RELAXATION AFTER OPTICAL PULSE EXCITATION TAKING INTO ACCOUNT NONEQUILIBRIUM PHONONS**

We present the model to describe the relaxation of superconducting state after action of ultrashort optical pulse, which takes account nonequilibrium phonons. The model is based on the Bogoliubov–de Gennes equations for superconducting state and the quantum Liouville equation for the reduced density matrix. The effects of temperature and excitation energy on the characteristic times are studied using numerical simulation.

Одной из актуальных задач современной физики является исследование высокотемпературных сверхпроводящих материалов при помощи метода «накачка-зондирование» с фемтосекундным разрешением [1]. Однако на таких временах может оказаться неприменима двухтемпературная модель [2] и потребуются явно учитывать неравновесность исследуемого состояния.

Данная работа продолжает цикл исследований по детальному описанию процессов релаксации в сверхпроводнике после воздействия ультракороткого лазерного импульса. В предыдущих работах [3 - 5] был сформулирован численный подход для моделирования кинетики неравновесного состояния с учётом импульсного распределения рассматриваемых частиц.



Для описания сверхпроводника была использована решёточная модель сильной связи с кулоновским взаимодействием в приближении среднего поля в виде уравнений Боголюбова–де Жена [6]. Динамика состояния описывалась квантовым уравнением Лиувилля для редуцированных матриц плотности электронной и фононной подсистем. В отличие от существующих работ [7, 8], в данной модели функция распределения фононов не считается известной и определяется самосогласованно.

Приведены результаты численного моделирования с модельными параметрами, продемонстрирована необходимость учёта неравновесности фононов в условиях данной задачи, исследовано влияние температуры и энергии возбуждающего импульса на характерные времена процессов.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (проект государственного задания № FSWU-2023-0031).

*Список литературы*

1. Kabanov V. V. Demsar J., Mihailovic D. // Phys. Rev. Lett. 2005. V. 95. P. 147002.
2. Tsibidis G.D., Mouchliadis L., Pedio M., Stratakis E. // Phys. Rev. B. 2020. V. 101. P. 075207.
3. Kuznetsov I.O., Kartsev P.F. // Phys. Rev. E. 2023. V. 107. P. 055304.
4. Kuznetsov I.O., Kartsev P.F. // IEEE TAS. 2022. V. 32 (4). P. 9000805.
5. Kartsev P.F., Kuznetsov I.O. // J. Phys.: Condens. Matter. 2021. V. 33. P. 295601.
6. Zhu J.-X. Bogoliubov-de Gennes Method and Its Applications. Cham: Springer, 2016.
7. Yu T., Wu M.W. // Phys. Rev. B. 2017. V. 96. P. 155311.
8. F. Yang and M.W. Wu // Phys. Rev. B. 2018. V. 98. P. 094507.

**В.А. КОЖЕВНИКОВ, А.П. АММОСОВ**

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

**АНАЛИЗ ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО СТОЛБА РАЗРЯДА  
ПОСТОЯННОГО ТОКА В ЛАЗЕРНОЙ ТРУБКЕ  
ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ ДИАМЕТРА  
ДЛЯ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ**

Получена система дифференциально-интегральных уравнений для положительного столба (ПС) разряда постоянного тока в лазерной трубке плавно изменяющегося диаметра для двухкомпонентной газовой смеси. Эта система решает задачу связи внешних параметров ПС (радиус разрядного канала, давление газа, разрядный ток) с его внутренними параметрами (электронная температура, концентрации электронов и ионов, напряженность продольного электрического поля).

**V.A. KOZHEVNIKOV, A.P. AMMOSOV**

*Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University*

**ANALYSIS OF THE POSITIVE COLUMN OF A DIRECT  
CURRENT DISCHARGE IN A VARIABLE DIAMETER  
LASER TUBE FOR A TWO-COMPONENT GAS MIXTURE**

A system of differential-integral equations for the positive column (PC) of a direct current discharge in a laser tube with a smoothly varying diameter for a two-component gas mixture was obtained. This system solves the problem of relating the PC's external parameters (discharge channel radius, gas pressure, discharge current) to its internal parameters (electron temperature, electron and ion concentrations, longitudinal electric field strength).

Для исследования зависимости влияния геометрии активного элемента газоразрядного лазера на его энергетические характеристики в [1] была построена физико-математическая модель, в которой получена система дифференциальных уравнений для связи внешних и внутренних параметров положительного столба (ПС) разряда постоянного тока в лазерной трубке при типичных для активных сред газоразрядных лазеров разрядных условиях для случая плавно меняющегося радиуса разрядного канала (под «плавно меняющимся» понимается непрерывность зависимости радиуса канала от продольной координаты). Эта система затем была преобразована к системе трансцендентных уравнений. В

дальнейшем эта система была численно решена для некоторых таких зависимостей [2], и решение этой системы было использовано [3] для расчёта выходной мощности He-Ne лазера с нетрадиционной геометрией активного элемента.

В дальнейшем модель была усложнена для случая двухкомпонентной газовой смеси (с атомами и ионами двух сортов, причём концентрации заряженных частиц являются функцией радиальной и продольной координат). Была получена система дифференциально-интегральных уравнений для всех неизвестных внутренних параметров ПС.

К сожалению, пока не удалось получить каких-либо аналитических решений или хотя бы свести эту систему к системе трансцендентных уравнений для более простого анализа (как в [1]), поэтому данная система решается численно (с помощью МКР). Полученное решение этой системы позволит более точно рассчитывать выходную мощность излучения газоразрядных лазеров с двухкомпонентной средой при нетрадиционной геометрии сечения активного элемента.

#### *Список литературы*

1. Fotiadi A.E., Kozhevnikov V.A., Privalov V.E. // Saint Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 2019. V. 12. No. 4. P. 93-103.
2. Kozhevnikov V.A., Privalov V.E., Shemanin V.G. // Springer Proceedings in Physics. 2021. V. 255, P. 343-350.
3. Kozhevnikov V.E., Privalov V.E., Fotiadi A.E., Shemanin V.G. // Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). 2021. P. 176-178.

С.В. ГАВРИШ, А.О. ПОТАПЕНКО, П.А. ЧИЛИКИНА

*Научно-производственное предприятие «Мелитта», Москва*

## **СОЗДАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЛАМП НА ОСНОВЕ КОРОТКОДУГОВОГО И КАПИЛЛЯРНОГО РАЗРЯДОВ ДЛЯ УФ-УСТАНОВОК**

Рассматриваются вопросы создания импульсных ламп на основе короткодугового и капиллярного разрядов в ксеноне, обеспечивающих максимальную эффективность оптико-электронных систем в спектральном диапазоне 200 - 300 нм. Расчётами показана необходимость получения яркостной температуры 20000 К. В результате выполненных исследований достигнута яркостная температура 20000 К для короткодугового разряда, а для капиллярного 16500 К.

S.V. GAVRISH, A.O. POTAPENKO, P.A. CHILIKINA

*Scientific and Production Enterprise «Melitta», Moscow*

## **CREATING EFFECTIVE PULSE LAMPS BASED ON SHORT-ARC AND CAPILLARY DISCHARGE FOR UV INSTALLATIONS**

This paper examines the development of pulsed lamps based on short-arc and capillary discharges in xenon, ensuring maximum efficiency of optoelectronic systems in the 200 - 300 nm spectral range. Calculations demonstrate the need for a brightness temperature of 20000 K. The study achieved a brightness temperature of 20000 K for the short-arc discharge and 16500 K for the capillary discharge.

В настоящее время в медицине, микроэлектронике, специальной технике получили широкое применение импульсные источники УФ-излучения (газоразрядные лампы – ГРЛ) на основе разряда в ксеноне. Особенность данных ГРЛ заключается в том, что при определённой организации формы плазменного канала (размера светящегося тела) и режимах эксплуатации лампы (короткая длительность импульса и высокая энергия разряда), исходя из выполненных расчётов, можно добиться яркостных температур около 20000 К, которые согласно закона смещения Вина обеспечивают максимум спектрального распределения излучения в диапазоне 200 - 300 нм, в котором гарантируется максимальная эффективность приборов для перечисленных областей применения.

В данной работе рассматриваются два вида импульсных разряда [1]:

- короткодуговой, не имеющий контакта с оболочкой ГРЛ, но ограниченный электродами, расстояние между которыми составляет 1 - 6 мм, что создает высокие температуры в области катода (катодное пятно) за счёт высоких плотностей тока в указанной области.
- капиллярный, который представляет собой узкий плазменный канал, сжатый кварцевой оболочкой малого диаметра (менее 5 мм) вокруг высокотемпературной оси протяженного межэлектродного промежутка.

Для реализации первого направления нами разработаны конструкции короткодуговых ГРЛ с одним и двумя электродами зажигания, изучены электрические, яркостные и спектральные характеристики разрабатываемого УФ-источника. Особое внимание уделено изучению влияния на характеристики УФ-излучения напряжения на лампе, давления ксенона, условий электрического питания. В результате проведённых исследований нами достигнута яркостная температура разряда, приближающаяся к 20000 К, спектр которой близок к распределению излучения абсолютно черного тела (рис. 1а).

При исследовании капиллярного разряда нами применена оригинальная методика изучения плазмы, разрядный промежуток которой разбит на три участка разных диаметров (7, 5, 3 мм). Такое техническое решение позволило нам изучить влияние диаметра разрядного канала на характеристики УФ-излучения при фиксированном токе разряда и различных давлениях рабочего газа. В результате выполненного комплекса исследований нами достигнута яркостная температура 14500 К (рис. 1б). Работы по увеличению яркостной температуры импульсной капиллярной лампы продолжаются.

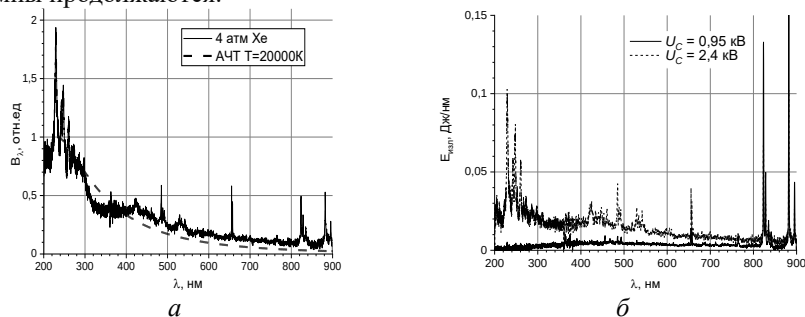


Рис. 1. Спектры излучения импульсных короткодуговой (а) и капиллярной (б) ламп

#### Список литературы

1. Импульсные источники света / под ред. И.С. Маршака. М.: Энергия, 1978.

М.Н. МЕШКОВ, О.Е. СИДОРЮК, А.А. ДОРОФЕЕВ<sup>1</sup>

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

*<sup>1</sup>ООО «Диноптех», Москва*

## **ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ В ТЕХНОЛОГИЯХ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ПРУЖИН**

Изложены основы технологии формообразования керамических пружин посредством нарезки их витков сфокусированным лазерным излучением. Характеристики экспериментальных образцов сопоставлялись с данными математического моделирования с использованием программы ANSYS.

M.N. MESHKOV, O.E. SIDORYUK, A.A. DOROFEEV<sup>1</sup>

*POLYUS Research Institute of M.F. Stelmakh, Moscow*

*<sup>1</sup>Dinoptech LLC, Moscow*

## **APPLICATION OF LASER CUTTING IN TECHNOLOGIES FOR FORMING PRECISION CERAMIC SPRINGS**

The fundamentals of ceramic spring shaping technology using focused laser beam cutting are presented. The characteristics of experimental samples were compared with mathematical modeling data using ANSYS software.

Рассмотрена возможность применения лазерных технологий в производстве пружин из керамических материалов. Существенно, что они имеют перспективы применения благодаря многообещающему сочетанию химических, термических и механических свойств. Они обладают высокими коррозионной и износостойкостью. В отличие от металлических, сохраняют эластичность при более высоких температурах. В ряде случаев неоспоримым преимуществом являются их диэлектрические свойства и отсутствие взаимодействия с магнитным полем.

В работе уделено внимание ключевым вопросам физики взаимодействия мощного лазерного излучения с поверхностью оксидных керамик. При выборе оптимальных подходов к созданию лазерной технологии формирования прецизионных деталей рассмотрены возможности и произведено сравнение коммерческих технологических установок двух типов: на базе импульсного CO<sub>2</sub> лазера с длиной волны 10,6 мкм и ультрафиолетового лазера с длиной волны 355 нм.

Для лазерных технологических установок созданы программы изготовления деталей – керамических пружин с разными формами, выбранными в ходе математического моделирования с оптимизацией распределений механических напряжений в условиях статической нагрузки. При этом использовался метод конечных элементов программного комплекса ANSYS.

На рис. 1а представлен пример расчётов внутренних напряжений в материале при действии на торец винтовой пружины силы, коллинеарной её оси. В процессе моделирования рассчитывались смещения элементов модели (рис. 1б) под действием предельно допустимой силы, вызывающей максимально возможное внутреннее напряжение для конкретного керамического материала. Установлено, что зазор между витками шириной, например, 0,4 - 0,5 мм может обеспечивать во всем диапазоне допустимых нагрузок функционирование керамических пружин из трубок СО-115М с внешним и внутренним диаметрами соответственно 12 и 10 мм (рис. 1в).

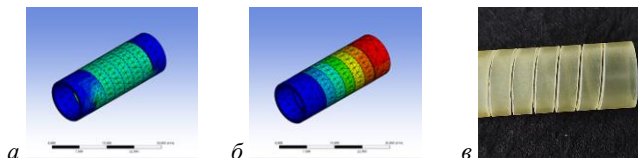


Рис. 1 Анализ математической модели (а, б) и фото экспериментального образца (в)

Аналогично изготовлению плоских спиральных пружин (рис. 2а) предшествовало математическое моделирование, в ходе которого достигалась оптимизация формы образцов с отсутствием областей концентрации напряжений, критических для разрушения деталей при смещениях (рис. 2б) под заданной нагрузкой.

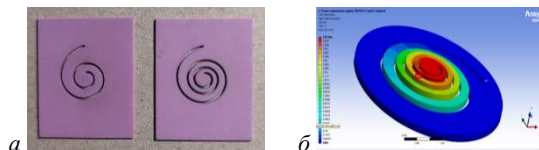


Рис. 2. Спиральные пружины из керамики BK94 (а), пример их анализа в ANSYS (б)

Экспериментальные образцы, полученные в настоящей работе, показывают перспективность рассмотренной технологии, расширяющей возможности формообразования прецизионных керамических деталей для различных областей техники.

Н.Х. ЧИНЬ<sup>1</sup>, Е.Ю. БЕЛЯНОВА, А.Ю. МИЛТО, М.П. ПАТАПОВИЧ

*Белорусская государственная академия связи, Минск*

<sup>1</sup>*Университет Винь, Ханой, Вьетнам*

## **ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОВЕРХНОСТЬЮ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО СПЛАВА**

Рассмотрено взаимодействие лазерного излучения с поверхностью металлической мишени. Показана возможность использования лазерного атомно-эмиссионного многоканального спектрометра LSS-1 для установления элементного состава многокомпонентных сплавов.

N.H. TRINH<sup>1</sup>, K.Yu. BELIANAVA, H.Yu. MILTO,

M.P. PATAPOVICH

*Belarusian State Academy of Communications, Minsk*

<sup>1</sup>*Vinh University, Hanoi, Vietnam*

## **FEATURES OF THE INTERACTION OF LASER RADIATION WITH THE SURFACE OF A MULTICOMPONENT ALLOY**

The interaction of laser radiation with surface of a metal target is examined. The feasibility of using the LSS-1 laser atomic emission spectrometer to determine the elemental composition of multicomponent alloys is demonstrated.

Для изучения особенностей взаимодействия лазерного излучения с поверхностью мишени многокомпонентного сплава могут применяться подходы, в основе которых лежат процессы как температурной релаксации, так и теплопроводности. В этом случае не будет иметь место поглощение энергии лазерного импульса ионами кристаллической решётки из-за экранирования излучения свободными электронами [1].

Физические процессы, которые связаны с образованием лазерной плазмы и её разлётом не находят достаточно простого варианта описания всех закономерностей, так как являются многофакторными. Соответственно, для описания происходящих процессов простых закономерностей получить не удастся.

Эксперименты по изучению свойств и качественного состава многокомпонентных сплавов проводились с использованием лазерного двухимпульсного многоканального атомно-эмиссионного спектрометра LSS-1, где имеется возможность анализировать как твёрдую, так жидкую



фазу вещества [2]. Для последующей обработки результатов полученные спектры можно сохранить в формате MS Office Excel. В качестве примера, на рис. 1, приведён внешний вид поверхности исследуемого объекта после серии воздействия сдвоенных лазерных импульсов без увеличения, а также, на рис. 2, тот же фрагмент под микроскопом. При этом энергия импульсов составляла 50 мДж, а межимпульсный интервал – 10 мкс. В случае необходимости представить полученные результаты после соответствующей обработки можно также с помощью других программ.

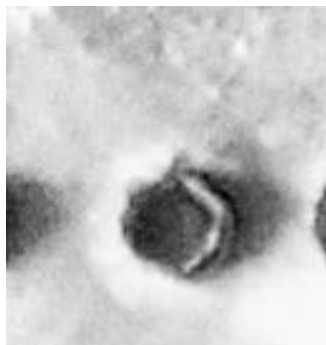


Рис. 1. Фотография поверхности исследуемого материала



Рис. 2. Фото исследуемого объекта под микроскопом

Приведённые результаты отчётливо демонстрируют сложный рельеф бруствера вокруг образовавшегося на металлической поверхности кратера.

Проведённые спектроскопические исследования лазерной плазмы вблизи поверхности многокомпонентных сплавов при воздействии на неё серии сдвоенных лазерных импульсов позволяют контролировать компонентный состав такой плазмы.

#### *Список литературы*

1. Aden M., et al. Laser-induced vaporization of a metal surface // J. of Physics. D. Appl. Physics. 1992. V. 25. No. 1. P. 57-65.
2. Зажогин А.П., Чинь Н.Х., Малец М.А., Патапович М.П. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2022. Вып. 14. С. 602-608.

И.Н. НИКОЛАЕВА<sup>1,2</sup>, Г.С. РОГОЖНИКОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>РФЯЦ – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Нижегородская обл.

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (филиал), Саров, Нижегородская обл.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ГЕНЕРИРУЕМОГО В УЛЬТРАТОНКИХ СПИНТРОННЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ Pt/Fe**

Представлены промежуточные результаты экспериментальных и расчётно-теоретических исследований характеристик электромагнитного излучения терагерцового диапазона частот, генерируемого в ультратонких спинтронных гетероструктурах Pt/Fe под воздействием фемтосекундного лазерного импульса.

I.N. NIKOLAEVA<sup>1,2</sup>, G.S. ROGOZHNIKOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Nizhny Novgorod region

<sup>2</sup>Sarov Branch of Lomonosov Moscow State University, Nizhny Novgorod region

## **SIGNATURE ANALYSIS OF TERAHERTZ RADIATION GENERATED IN ULTRATHIN SPINTRONIC Pt/Fe HETEROSTRUCTURES**

Intermediate results of experimental and theoretical study concerning signature analysis of terahertz radiation generated in ultrathin spintronic Pt/Fe heterostructures under the influence of a femtosecond laser pulse have been presented.

Объектом исследований выступали гетероструктуры Pt(5 нм)/Fe(3 нм)/с-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, полученные методом импульсного лазерного осаждения, обладающие высокой степенью стехиометрии слоёв и низким содержанием примесей, что было подтверждено экспериментально методами энергодисперсионного анализа.

При падении на поверхность гетероструктуры Pt/Fe со стороны слоя ферромагнетика ультракороткого лазерного импульса, в слое антиферромагнетика формировался ТГц-импульс с полосой частот от 0,1 ТГц до, предположительно, 2,5 ТГц (ограничение со стороны детектора). Одновременно с поворотом вектора намагниченности ферромагнитного слоя наблюдалось и изменение фазы в терагерцовом пучке, что согласуется с механизмом генерации на основе спинового тока и обратного спинового эффекта Холла в Pt [1]. Была измерена зависимость

амплитуды ТГц-поля от мощности накачки: в области умеренных мощностей наблюдался линейный рост сигнала, а при дальнейшем увеличении мощности – насыщение, связанное с нагревом гетероструктуры лазерным излучением и снижением эффективности преобразования спинового тока в зарядовый [2, 3].

Для интерпретации экспериментальных данных были проведены расчётно-теоретические исследования с использованием многослойной оптической модели. Рассчитано распределение поглощённой мощности по толщине гетероструктуры Pt(5 нм)/Fe(3 нм), а также показано перераспределение энергии между слоями и роль интерфейса Fe/Pt. На основе трёхтемпературной модели для слоя Fe определены временные шкалы нагрева электронов, решётки и спиновой подсистемы и их влияние на формирование импульса спинового тока через межслойный интерфейс с Pt. Полученные расчёты качественно воспроизводят длительность и амплитудную зависимость зарегистрированного ТГц-излучения и подтверждают, что максимальный вклад в сигнал вносит сверхбыстрая передача спинового момента из ферромагнетика в слой Pt. Результаты демонстрируют перспективность ультратонких структур Pt/Fe как компактных спинтронных ТГц-источников.

*Список литературы*

1. Rouzegar R., et al. Laser-induced terahertz spin transport in magnetic nanostructures arises from the same force as ultrafast demagnetization // *Physical Review B*. 2022. V. 106. No. 14. P. 144427.
2. Kampfth T., et al. Terahertz spin current pulses controlled by magnetic heterostructures // *Nature nanotechnology*. 2013. V. 8. No. 4. P. 256-260.
3. Yang D., et al. Powerful and tunable THz emitters based on the Fe/Pt magnetic heterostructure / *arXiv preprint arXiv:1607.02814*. 2016.

Т.А. НАЗАРОВА, М.Н. ЕРШКОВ, А.Е. ШЕПЕЛЕВ<sup>1</sup>,  
С.А. СОЛОХИН

*Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева*

*<sup>1</sup>Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых*

## **ВНУТРИРЕЗОНАТОРНОЕ УДВОЕНИЕ ЧАСТОТЫ ГЕНЕРАЦИИ КОМПОЗИТНОГО КЕРАМИЧЕСКОГО YAG: Nd<sup>3+</sup> / YAG: Cr<sup>4+</sup> ЛАЗЕРА**

Представлены результаты экспериментальных исследований генерации второй гармоники композитного керамического YAG: Nd<sup>3+</sup> / YAG: Cr<sup>4+</sup> лазера при внутрирезонаторном удвоении частоты в кристалле КТР. Максимальная средняя мощность генерации на длине волны 0.532 мкм составила 13.5 мВт при длительности импульсов второй гармоники 17.2 нс и частоте их следования 74.3 кГц.

T.A. NAZAROVA, M.N. ERSHKOV, A.E. SHEPELEV<sup>1</sup>,  
S.A. SOLOKHIN

*Kovrov State Technological Academy named after V.A. Degtyarev*

*<sup>1</sup>Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs*

## **INTRACAVITY FREQUENCY DOUBLING OF A COMPOSITE CERAMIC YAG: Nd<sup>3+</sup> / YAG: Cr<sup>4+</sup> LASER GENERATION**

The results of experimental studies of the second harmonic generation of a composite ceramic YAG: Nd<sup>3+</sup> / YAG: Cr<sup>4+</sup> laser with intracavity frequency doubling in a KTP crystal are presented. The maximum average power at a wavelength of 0.532  $\mu\text{m}$  was 13.5 mW with a second harmonic pulse duration of 17.2 ns and a repetition frequency of 74.3 kHz.

Компактные лазеры, излучающие одновременно на длинах волн видимого и инфракрасного диапазонов, могут найти практическое применение в лидарах, применяемых для управления беспилотными транспортными средствами в сложных погодных условиях. Отдельный интерес представляют композитные керамические YAG: Nd<sup>3+</sup> / YAG: Cr<sup>4+</sup> лазеры, способные генерировать короткие нано и пикосекундные импульсы с высокой мощностью излучения [1 - 3].

Целью данной работы является экспериментальное исследование параметров генерации твердотельного лазера на базе композитного элемента, изготовленного из отечественной YAG: Nd<sup>3+</sup> / YAG: Cr<sup>4+</sup>

керамики с внутррезонаторным удвоением частоты в кристалле КТР. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Композитный элемент 1 состоял из активной части  $\text{YAG: Nd}^{3+}$  длиной 9 мм, и пассивной части  $\text{YAG: Cr}^{4+}$  длиной 3 мм. Начальное пропускание  $\text{YAG: Cr}^{4+}$  составляло 80 %. Входное зеркало 2 с радиусом кривизны  $r = 150$  мм имело пропускание 92 % на  $\lambda = 0.808$  мкм и отражение 100 % на  $\lambda = 1.064$  мкм. В качестве выходного зеркала 3 использовали плоские зеркала с отражением  $R_{out} = 84$  % и  $R_{out} = 94$  % на  $\lambda = 1.064$  мкм, а также сферическое зеркало с  $r = 400$  мм и отражением  $R_{out} = 96$  % на  $\lambda = 1.064$  мкм. Для генерации второй гармоники на  $\lambda = 0.532$  мкм использовали кристалл КТР 4 с размерами  $6 \times 6 \times 5$  мм<sup>3</sup>. Лазерный диод 5 обеспечивал импульсный режим работы с мощностью накачки до 0.5 Вт при длительности импульсов 2.5 мс и частоте их следования 20 Гц. Сферические линзы 6 и 7 обеспечивали фокусировку излучения накачки в пятно диаметром 280 мкм.

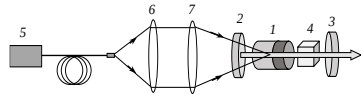


Рис. 1. Схема установки

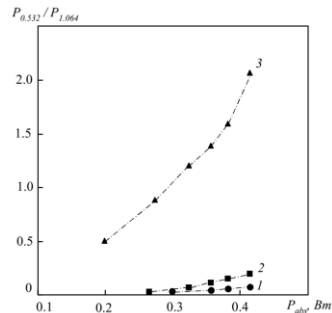


Рис.2. Соотношение мощностей на удвоенной и основной частоте:  
 1 –  $R_{out} = 86$  %; 2 –  $R_{out} = 94$  %;  
 3 –  $R_{out} = 96$  % ( $r = 400$  мм)

На рис. 2 представлены зависимости соотношения мощностей излучения на удвоенной и основной частоте. При использовании зеркал с  $R_{out} = 86$  % и  $R_{out} = 94$  % генерация происходила преимущественно на  $\lambda = 1.064$  мкм: доля второй гармоники не превышала 20%. При использовании вогнутого зеркала с  $R_{out} = 96$  % соотношение мощностей изменялось в широких пределах: от 0.5 при  $P_{abs} = 0.2$  Вт до 2.1 при  $P_{abs} = 0.41$  Вт. Максимальная средняя мощность на  $\lambda = 0.532$  мкм составила 13.5 мВт. Длительность импульсов второй гармоники составила 17.2 нс при частоте их следования 74.3 кГц.

#### Список литературы

1. Pavel N., Tsunekane M., Taira T. // Optics Express. 2011. V. 19 (10). P. 9378.
2. Sandu O., Salamu G., et al. // Quantum Electronics. 2012. V. 43 (3). P. 211.
3. Lim H.H., Taira T. // Optics Express. 2022. V. 30 (4). P. 5151.

А.А. КОРШУНОВ<sup>1,2</sup>, М.Д. МОЖАЕВА<sup>1,2</sup>, А.А. ГАРМАТИНА<sup>1</sup>,  
В.Е. АСАДЧИКОВ<sup>1</sup>, Е.И. МАРЕЕВ<sup>1</sup>, Н.В. МИНАЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт фотонных технологий НИЦ «Курчатовский институт», Троицк

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

## **ВЛИЯНИЕ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ПРЕДЫМПУЛЬСА ПРИ СОЗДАНИИ МИКРОФОКУСНОГО ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИСТОЧНИКА НА ОСНОВЕ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ФЕМТОСЕКУНДНОГО УСИЛИТЕЛЯ**

Реализована схема получения микрофокусного рентгеновского источника, использующая излучение регенеративного фемтосекундного усилителя (частота воздействия импульсов до 200 кГц, 20 Вт), воздействующее на медную мишень. Исследовано влияние фемтосекундного предымпульса на выход рентгеновских фотонов и размер рентгеновского источника. Полученный поток характеристических фотонов составляет более 1010 фот/с/2 $\pi$ .

A.A. KORSHUNOV<sup>1,2</sup>, M.D. MOZHAIEVA<sup>1,2</sup>, A.A. GARMATINA<sup>1</sup>,  
V.E. ASADCHIKOV<sup>1</sup>, E.I. MAREEV<sup>1</sup>, N.V. MINAEV<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Institute Photon Technologies of NRC «Kurchatov Institute», Troitsk

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

## **INFLUENCE OF THE FEMTOSECOND PRE-PULSE IN THE CREATION OF A MICROFOCUS LASER-PLASMA X-RAY SOURCE BASED ON REGENERATIVE FEMTOSECOND AMPLIFIER**

A scheme for obtaining a microfocus X-ray source using radiation of a regenerative femtosecond amplifier (pulse repetition rate up to 200 kHz) interacting with a copper target is implemented. The effect of the femtosecond pre-pulse on the X-ray yield and the size of the X-ray source is investigated. The resulting characteristic photon flux is more than 10<sup>10</sup> photons/s/2 $\pi$ .

Лазерно-плазменные источники характеристического рентгеновского излучения с высоким числом фотонов за импульс находят применения в задачах получения изображения внутренней структуры объекта, что важно для задач медицины и биологии, позволяя получать контрастные и чёткие изображения даже в слабопоглощающих в рентгеновском спектре тканях.

Развитие современных лазерных технологий позволяет создать компактный лазерно-плазменный источник на базе лазерных систем. Существенным при создании такого источника является поток фотонов, а также размер получаемого источника, который должен быть минимальным. При этом удобно размещать мишень в атмосфере воздуха, но ионизация приповерхностной области мишени может негативно влиять на поток фотонов и размер источника. Расчёты показывают, что, управляя состоянием приповерхностной области, например, используя схему с определённой задержкой лазерных импульсов друг относительно друга, можно повысить выход рентгеновских фотонов, уменьшая влияние ионизации среды, и уменьшить размер получаемого источника [1].

Целью настоящей работы было исследование зависимости выхода рентгеновского излучения (РИ) от энергии лазерного импульса регенеративного фемтосекундного усилителя. А также исследование влияния состояния окружающей среды в приповерхностной области на выход рентгеновского излучения и поиск оптимальных лазерных параметров для создания микрофокусного рентгеновского источника.

Проведены измерения выхода РИ в атмосфере воздуха и при пониженном давлении в зависимости от энергии лазерных импульсов. В работе обсуждаются результаты, полученные с использованием двухимпульсной схемы воздействия с использованием интерферометра Маха-Цандера. Один пучок используется для предиионизации среды, второй – для генерации РИ в уже ионизированной плазме. Использование моторизованных подвижек позволило регулировать временную задержку между разделёнными лазерными импульсами. Полученный поток рентгеновских фотонов составил более  $10^{10}$  фот./импульс в  $2\pi$ , что превосходит результат, получаемый ранее с использованием волоконного лазера с энергией в импульсе, ограниченной на уровне 40 мкДж [2].

#### *Список литературы*

1. Bravy B.G., Gordienko V.M. Efficient X-Ray generation in the field of femtosecond tandem fiber laser pulses with low energy and high repetition rate: the role of nonlinear processes of the interaction with a target // *Physics of Wave Phenomena*. 2025. V. 33. No. 1. P. 1-8.
2. Garmatina A.A., et al. Vacuum-free femtosecond fiber laser microplasma X-ray source for radiography // *Optics Express*. 2023. V. 31. No. 26. P. 44259-44272.

С.А. АСТАШКЕВИЧ, С.В. ГОРДЕЕВ, И.Ч. МАШЕК,  
Р.С. ХОРОНЖУК, И.В. ЧЕКУНОВ<sup>1</sup>

*Санкт-Петербургский государственный университет*

*<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛАМПОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ДЛЯ МНОГОКАНАЛЬНОЙ НАКАЧКИ В СТАНДАРТАХ ЧАСТОТЫ**

Проведено исследование и моделирование излучательных характеристик источников накачки на основе ламповых излучателей в стандартах частоты Ч1-1022. Исследована эффективность многоканальной накачки, используя волоконно-оптическую передачу излучения.

S.A. ASTASHKEVICH, S.V. GORDEEV, I.C. MASHEK,  
R.S. KHORONZUK, I.V. CHEKUNOV<sup>1</sup>

*Saint Petersburg State University*

*<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University*

## **INVESTIGATION OF EFFECTIVENESS OF LAMP SOURCES FOR MULTICHANNEL PUMPING IN FREQUENCY STANDARDS**

A research and modeling of the radiation characteristics of pump sources based on lamp emitters in the frequency standards H1-1022 have been carried out. The effectiveness of multi-channel pumping using fiber-optic radiation transmission is investigated.

Важным вопросом повышения стабильности стандарта частоты [1, 2] является эффективность использования нескольких независимых каналов накачки при наличии единого излучателя.

Сравнение уровней накачки в существующих стандартах частоты на эффекте двойного радио-оптического резонанса (ДРОР) при использовании непрерывной лазерной накачки (200 - 250 мкВт/см<sup>2</sup>·нм) и лампового излучателя (20 - 25 мкВт/см<sup>2</sup>·нм) показывает, что полученные значения плотности мощности накачки излучателя стандарта Ч1-1022 находятся на нижней границе получения сигналов ДРОР. Попытка организации дополнительных каналов методом деления мощности на несколько каналов, даже трёх, приводит к проблемно низким уровням накачки.



Перспективным является формирование нескольких каналов накачки на основе одной лампы с высокочастотным (ВЧ) возбуждением и разведение излучения по частотным дискриминаторам с помощью волоконных жгутов [3]. Нами был использован блок распределения излучения от ВЧ возбуждаемой лампы накачки (Rb, Cs) на пяти волоконно-оптических каналах. Измерения спектральных характеристик рубидиевых ламп накачки проводились с помощью спектрометра с волоконно-оптическим вводом излучения AVASPEC-1024-USB2 (диапазон 200 - 1100 нм, разрешение 1.2 нм) [4]. Измерялись абсолютные значения спектральной яркости источника излучения. Калибровка спектрометра проводилась по излучению черного тела.

Спектр излучения на выходе волоконного жгута при освещении используемой лампы представлен на рис. 1. При учёте того, что исследуемая лампа содержит естественную смесь изотопов рубидия ( $^{85}\text{Rb}$  и  $^{87}\text{Rb}$ ) и при пересчёте на время измерения, наблюдаемая интенсивность вполне соотносится с интенсивностью лампы стандарта Ч1–1022.

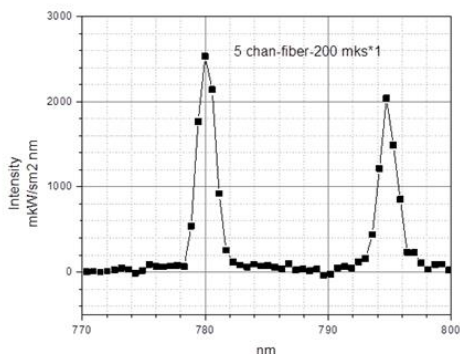


Рис. 1. Спектр сигнала на выходе волоконно-оптического жгута пятиканального излучателя

Данная работа выполнена при поддержке ПАО «ПНППК» (договор № 01/1-55-49-СПбГУ).

#### Список литературы

1. Дудкин В.И., Пахомов Л.Н. Квантовая электроника. Приборы и их применение. М.: Техносфера. 2006.
2. Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложения. М.: Физматлит, 2009.
3. <https://lzos.ru/products/volonkonno-opticheskie-izdeliya/zhguty-gibkie-dlya-peredachi-sveta/>.
4. <https://www.avantes.ru/spectro/avaspec1024.php>.

С.А. АСТАШКЕВИЧ, С.В. ГОРДЕЕВ, И.Ч. МАШЕК,  
Р.С. ХОРОНЖУК, И.В. ЧЕКУНОВ<sup>1</sup>

*Санкт-Петербургский государственный университет*

*<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ–ПЕРО ПРИ ЛАЗЕРНОЙ НАКАЧКЕ СТАНДАРТА ЧАСТОТЫ**

Разработаны и исследованы макеты накачки на основе лазерных полупроводниковых излучателей с использованием интерферометра Фабри–Перо и проведена оценка эффективности его применения в стандартах частоты.

S.A. ASTASHKEVICH, S.V. GORDEEV, I.C. MASHEK,  
R.S. KHORONZUK, I.V. CHEKUNOV<sup>1</sup>

*Saint Petersburg State University*

*<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University*

## **USING FABRY–PEROT INTERFEROMETER FOR LASER PUMPING OF FREQUENCY STANDARD**

Layouts of pumping based on laser semiconductor emitters using a Fabry–Perot interferometer have been developed and investigated, and the effectiveness of its use in frequency standards has been evaluated.

Существует большое число разработок стандартов частоты на атомах рубидия, основанных на явлении двойного радиооптического резонанса (ДРОР) с использованием лазерной накачки [1 - 3]. Высокая чувствительность частоты генерации лазерного диода к температуре кристалла с одной стороны позволяет обеспечить настройку излучателя на необходимую длину волны, с другой – определяет весьма жёсткие требования к стабильности температуры диода в рабочем режиме.

Для стабильной работы частотного дискриминатора обычно используется дополнительный канал привязки частоты излучателя к выбранному атомному переходу и дополнительную опорную ячейку. Такого рода схемы широко применяются, но неизбежно ведут к увеличению габаритов и энергопотребления стандарта.

В настоящей работе было предложено использовать интерферометр Фабри–Перо с разрешением, сравнимым с доплеровской шириной возбуждаемого перехода. Так как в свете флуоресценции, регистрируемой от резонансной ячейки, неизбежно присутствует и возбуждающий

лазерный свет, то интерферометр регистрирует суммарный контур, состоящий как из сигналов флуоресценции, так и из лазерного света. Анализ интерферограммы позволяет выделить величину и знак сигнала частотной расстройки между лазерным светом и полосой флуоресценции.

Интерферометр Фабри–Перо был создан на основе измерительной пластины ПИ-20 толщиной 15.75 мм с качеством поверхностей и их параллельностью не хуже  $\lambda/20$ . На поверхности было нанесено интерференционное покрытие с максимумом коэффициента отражения 92 % на длине волны 780 нм. При указанном качестве поверхностей и выбранных коэффициентах отражения зеркал прибор имеет реальную резкость, ограниченную качеством пластины эталона и равную 12. Свободный спектральный интервал равен 6.72 ГГц, полуширина аппаратной функции не превышает 450 МГц.

Распределение интенсивностей в интерференционной картине на выходе интерферометра Фабри–Перо было проанализировано с помощью универсальной малогабаритной камеры BASLER Ace-100 gc [4] с последующей обработкой полученных изображений в системе MATCAD. На рис. 1 приведён пример интерферограммы сигнала флуоресценции эталонной ячейки с парами атомов рубидия и её фотометрический анализ для случая неполного совпадения частоты лазера и частоты сверхтонкого перехода рубидия.

Предложенный нами метод обладает такими потенциальными достоинствами как отсутствие необходимости дополнительной резонансной ячейки и принципиальное отсутствие необходимости внесения частотной модуляции в лазерный источник.

Данная работа выполнена при поддержке ПАО «ПНППК» (договор № 01/1-55-49-СПбГУ).

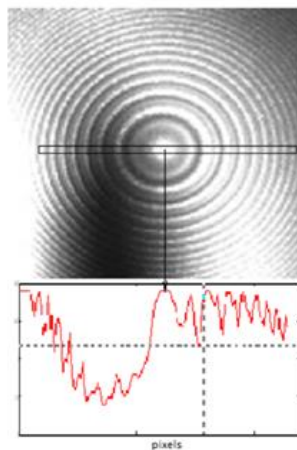


Рис. 1. Пример интерферограммы сигнала флуоресценции ячейки с парами атомов рубидия

#### Список литературы

1. Александров Е.Б., Вершовский А.К. // УФН. 2009. Т. 179. № 6. Р. 605–637.
2. Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложения. М.: Физматлит, 2009.
3. Gharavipour M., Affolderbach C., Kang S., Mileti G. // J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. 793. P. 012007.
4. <https://docs.baslerweb.com/basler-ace/>.

А.С. ЩЕКИН<sup>1,2</sup>, Д.С. ГУРСКИЙ<sup>1</sup>, Э.Д. ИШКИНЯЕВ<sup>1,2</sup>,  
В.Н. ПЕТРОВСКИЙ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

<sup>2</sup>ООО «НПП ЛАССАРД», Москва

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТОВ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОГО  
ДВИЖЕНИЯ И ПЛАЗМЕННОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ  
ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ  
НАНОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ  
МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ**

Представлена модель для процесса эволюции поверхности монокристаллического кремния при воздействии наносекундными лазерными импульсами. Модель включает в себя гидродинамическую составляющую для расчёта поведения ванны расплава, а также модель локального термодинамического равновесия плазмы для расчёта эффекта экранирования. Численно рассчитаны параметры, влияющие на морфологию кратера при лазерной обработке и проведена валидация результатов моделирования.

A.S. SHCHEKIN<sup>1,2</sup>, D.S. GURSKIY<sup>1</sup>, I.D. ISHKINYAEV<sup>1,2</sup>,  
V.N. PETROVSKIY<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

<sup>2</sup>LLC NPP LASSARD, Moscow

**EVALUATION OF THERMOKAPILLARY MOVEMENT  
AND PLASMA SHIELDING EFFECTS IN NUMERICAL  
SIMULATION OF NANOSECOND LASER ABLATION  
OF MONOCRYSTALLINE SILICON**

A model describing the evolution of the surface of a silicon single crystal under the influence of nanosecond laser pulses is presented. The model includes a hydrodynamic component to simulate the behavior of the melt pool, and a local thermodynamic equilibrium plasma model is used to account for the shielding effect. The parameters affecting the crater morphology during laser processing were numerically calculated and experimentally validated.

Монокристаллический кремний является основным материалом для компонентов микроэлектроники. Более того, благодаря своей чистоты и однородности кремний подходит как модельный материал для исследований. В задачах микроэлектроники остро стоит проблема

эффективного и безопасного разделения кремниевых подложек на чипы. Одним из методов разделения подложек может быть лазерное скрайбирование или резка пластины. Однако при наносекундной обработке есть ряд особенностей во взаимодействии и в формировании кратера за счёт гидродинамических и плазменных эффектов [1].

Цель данной работы – построение модели процесса абляции монокристалла кремния с учётом эффектов термокапиллярного движения ванны расплава и плазменного экранирования при достижении порога плазмообразования. Данные эффекты определяют характер абляции материала при заданных параметрах лазерного излучения.

Для учёта поведения ванны расплава и её влияния на морфологию кратера, была построена гидродинамическая модель, как система нестационарных уравнений с дополнительными уравнениями теплопроводности, динамической вязкости и плотности. Далее, для оценки вклада коэффициента плазменного экранирования, была использована модель локального термодинамического равновесия [2, 3].

Для определения параметров лазерно-индуцированной плазмы (температуры плазмы, а также концентраций электронов и ионов) в рамках данной модели вводится предположение о её локализации в приповерхностном слое Кнудсена.

Экспериментальная проводилась сравнением геометрии формируемых кратеров, полученных численным расчётом и экспериментом.

*Список литературы*

1. Cao H., et.al. // Opt. Lasers Eng. 2025.V. 186. P. 108786.
2. Rozman R., Grabec I., Govekar E. // Appl. Surf. Sci. 2008. V. 254. No. 11. P. 3295-3305.
3. Gao A., et.al. // Langmuir. American Chemical Society. 2021. V. 37. No. 29. P. 8677-8686.

Н.Х. ЧИНЬ<sup>1</sup>, А.В. ЩУКО, К.Д. ТИТКО, М.П. ПАТАПОВИЧ

*Белорусская государственная академия связи, Минск*

<sup>1</sup>*Университет Винь, Ханой, Вьетнам*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА СИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ**

Показана возможность получения спектров сложных соединений с целью изучения их физических и химических свойств. Эксперименты были проведены с помощью лазерного двухимпульсного атомно-эмиссионного многоканального спектрометра LSS-1. Представлено краткое обсуждение результатов.

N.H. TRINH<sup>1</sup>, A.V. SHCHUKO, K.D. TSITKO, M.P. PATAPOVICH

*Belarusian State Academy of Communications, Minsk*

<sup>1</sup>*Vinh University, Hanoi, Vietnam*

## **DETERMINATION OF THE COMPOSITION OF SYNTHETIC MATERIALS BY LASER ATOMIC EMISSION SPECTROMETRY**

The feasibility of obtaining spectra of complex compounds for the purpose of studying their physical and chemical properties is demonstrated. Experiments were carried out using an LSS-1 laser dual-pulse atomic emission multichannel spectrometer. A brief discussion of the results is provided.

Пластмасса представляет собой искусственный материал, способный менять форму при нагревании и под давлением, а при остывании сохранять новую форму. Благодаря своим свойствам, таким как прочность, гибкость, устойчивость к химическим воздействиям, она находит применение в различных областях: медицина, строительство, электроника, производство упаковки. Главным компонентом пластмассы является смола — полимер, отвечающий за целостность и форму изделия. Дополнительно к полимерам в состав данных материалов могут входить разные добавки: композиты, стабилизаторы, антипирены [1].

Для определения наличия тех или иных простых веществ, составляющих сложное соединение, был использован лазерный двухимпульсный атомно-эмиссионный многоканальный спектрометр LSS-1. Для получения качественных результатов имеется возможность подбора оптимальных условий работы: энергии импульсов, количества

импульсов, временной задержки между сдвоенными импульсами, параметра расфокусировки. Регистрация спектров исследуемых объектов, а также управление параметрами лазера осуществляется через программное обеспечение LaesSpectrometer [2]. В качестве примера, на рис. 1 и 2, приведены внешний вид изучаемого образца и фрагмент полученного эмиссионного спектра после серии пятидесяти воздействующих сдвоенных лазерных импульсов. При этом энергия накачки лазера составляла 20 Дж, межимпульсный интервал – 10 мкм, а параметр расфокусировки равнялся 0,5 мм.



Рис. 1. Фотография исследуемого сплава

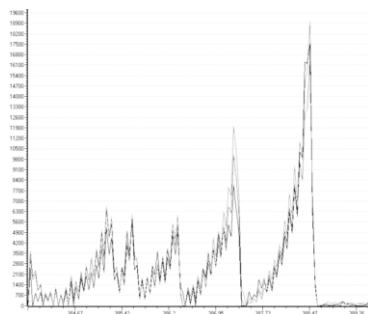


Рис. 2. Фрагмент спектра

Приведённые результаты отражают наличие в составе исследуемого материала линии группы циана (CN), содержащегося в пластмассе и красителях.

Таким образом, полученные результаты отражают возможность исследования различных материалов с целью изучения в их составе более простых соединений.

#### *Список литературы*

1. Беушев А.А., Комарова Н.Г. // Определение состава пластмасс. Барнаул, АлтГТУ. 2023.
2. Баззал Х., Воропай Е.С., Зажогин А.П., Патапович М.П. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2019. Вып. 11. С. 57-64.

А.Ф. КОВАЛЕНКО<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики  
им. Н.Л. Духова, Москва*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **КРИТЕРИЙ ТЕРМОПРОЧНОСТИ ПЛАСТИНЫ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЛАЗЕРНОМ ОТЖИГЕ С УЧЁТОМ ОТРАЖЕНИЯ ОТ ТЫЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

В рамках квазистатической несвязанной задачи термоупругости получено аналитическое соотношение, являющееся критерием термopочности при отжиге неметаллической пластины миллисекундными лазерными импульсами и частичном её накрытии излучением. Критерий учитывает отражение лазерного излучения от тыльной поверхности пластины. Проведена экспериментальная проверка адекватности расчётной модели.

A.F. KOVALENKO<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA), Moscow*

<sup>2</sup>*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*

## **CRITERION OF THERMAL STRENGTH OF A PLATE DURING IMPULSE LASER ANNEALING, TAKING INTO ACCOUNT REFLECTION FROM THE REAR SURFACE**

Within the framework of the quasi-static unconnected problem of thermoelasticity, an analytical relationship has been obtained that is a criterion for thermal strength during the annealing of a non-metallic plate with millisecond laser pulses and partial covering of the plate with radiation. The criterion takes into account the reflection of laser radiation from the back surface of the plate. An experimental verification of the adequacy of the computational model has been conducted.

Для отжига диэлектрических и полупроводниковых пластин после ионной имплантации используют импульсные лазеры, работающие в режимах свободной генерации или модулированной добротности [1, 2]. Для воздействия в режиме свободной генерации можно рассматривать квазистатическую несвязанную задачу термоупругости [1]. Будем считать пластину термостойкой, если она не будет разрушена термоупругими напряжениями в процессе нагрева её поверхности от начальной температуры до температуры отжига.

В [1] для случая частичного накрытия пластины лазерным излучением получены аналитические соотношения для расчёта плотности энергии



лазерного излучения, требуемой для достижения температуры поверхности пластины температуры отжига, плотности энергии, вызывающей разрушение пластины термоупругими напряжениями и соотношению, являющееся критерием термопрочности пластины:

$$\frac{\sigma_{ВР}(1-\nu)}{E\alpha_T(T_f-T_0)} \geq \frac{1}{2} \left\{ \frac{1-e^{-\chi h}}{\chi h} + \frac{6}{(\chi h)^2} \left[ \frac{\chi h}{2} - 1 + e^{-\chi h} \left( 1 + \frac{\chi h}{2} \right) \right] \right\} (\rho_{П}^2 + 1), \quad (1)$$

где  $\sigma_{ВР}$  – предел прочности материала пластины на растяжение;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $E$  – модуль Юнга;  $T_f$  – температура отжига;  $T_0$  – начальная температура;  $\chi$  – показатель поглощения материала пластины на длине волны лазерного излучения;  $h$  – толщина пластины;  $\rho_{П}$  – отношение радиуса пятна лазерного излучения на поверхности пластины к её радиусу.

Уравнение (1) справедливо для большинства оптических стёкол, у которых показатель преломления не превышает значений 1,5 - 1,65, и коэффициентом отражения от тыльной поверхности пластины, можно пренебречь. Однако, для материалов с большими значениями показателя преломления, отражением лазерного излучения от тыльной поверхности пластины пренебрегать нельзя. С учётом отражения от тыльной поверхности пластины уравнение (1) примет вид:

$$\frac{\sigma_{ВР}(1-\nu)}{E\alpha_T(T_f-T_0)} \geq \frac{1}{2(1+Re^{-2\chi h})} \left\{ \frac{1-(1-R)e^{-\chi h}-e^{-2\chi h}R}{\chi h} + \frac{6}{(\chi h)^2} \left[ \frac{\chi h}{2} - 1 + e^{-\chi h} \left( 1 + \frac{\chi h}{2} \right) + R \left[ e^{-\chi h} \left( \frac{\chi h}{2} - 1 \right) + e^{-2\chi h} \left( \frac{\chi h}{2} + 1 \right) \right] \right] \right\} (\rho_{П}^2 + 1), \quad (2)$$

где  $R$  – коэффициент отражения материала пластины.

Учёт отражения лазерного излучения от тыльной поверхности пластины приводит к уменьшению плотности энергии, требуемой для достижения облучаемой поверхностью температуры отжига при значении параметра  $\chi h < 2$ , но увеличивает термоупругие напряжения в пластине.

Критерий термопрочности пластины для случая её полного накрытия излучением получен в работе [3]. Проведена экспериментальная проверка адекватности полученных аналитических соотношений.

#### Список литературы

1. Коваленко А.Ф. Лазерный импульсный отжиг стеклянных пластин при частичном их накрытии излучением // Стекло и керамика. 2018. № 2. С. 27-31.
2. Коваленко А.Ф. Отжиг стеклообразных и керамических материалов наносекундными лазерными импульсами // Стекло и керамика. 2018. № 6. С. 37-42.
3. Бутин В.И., Коваленко А.Ф. Учет отражения от тыльной поверхности при лазерном отжиге пластин из оптических стекол с высокими значениями показателя преломления // Стекло и керамика. 2025. № 6. С. 18-23.

А.Н. ЕГОРОВ<sup>1,2</sup>, Д.К. ДЕРИМЕДВЕДЬ<sup>1,2</sup>, Е.О. ЕПИФАНОВ<sup>2</sup>,  
Н.В. МИНАЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

<sup>2</sup>Институт фотонных технологий НИЦ «Курчатовский Институт», Троицк

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ФЕМТОСЕКУНДОВОГО ЛАЗЕРНОГО ФОРМИРОВАНИЯ НАНОЧАСТИЦ МЕТАЛЛОВ В ОПТИЧЕСКИХ ПРОЗРАЧНЫХ МАТЕРИАЛАХ И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ НА ПРАКТИКЕ**

Разработана и собрана экспериментальная установка для проведения исследований по формированию наночастиц из прекурсоров благородных металлов в объёме оптических прозрачных материалов с использованием подхода по разработке цифрового двойника. Исследуется получение наноструктур при использовании фемтосекундного лазерного излучения, в том числе в нелинейном (двухфотонном) режиме поглощения.

A.N. EGOROV<sup>1,2</sup>, D.K. DERIMEDVED<sup>1,2</sup>, E.O. EPIFANOV<sup>2</sup>,  
N.V. MINAEV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

<sup>2</sup>Institute Photon Technologies, of NRC «Kurchatov Institute», Troitsk

## **DEVELOPMENT OF METHODS FOR FEMTOSECOND LASER FORMATION OF METAL NANOPARTICLES IN OPTICAL TRANSPARENT MATERIALS AND ITS IMPLEMENTATION**

An experimental setup has been developed and assembled for research on the formation of nanoparticles from noble metal precursors in optically transparent materials using a digital twin approach. The production of nanostructures using femtosecond laser radiation, including in the nonlinear (two-photon) absorption mode, is being investigated.

Плазмонные наночастицы – это особый вид наноструктур, состоящих из благородных металлов, преимущественно золота и серебра [1], которые способствуют локализации электромагнитного поля в масштабах меньших длин волн оптического диапазона [2]. Это свойство позволяет создавать на их основе медицинские сенсоры для детектирования объектов широкого спектра, оптические фильтры и другое [3].

Целью работы является разработка и создание цифрового двойника экспериментальной установки и её последующая сборка для проведения работ по образованию плазменных наночастиц из прекурсоров благородных металлов в объёме прозрачных оптических материалов с использованием фемтосекундного лазерного излучения.

На рис. 1 представлена трёхмерная модель и собранный на её основе прототип экспериментальной установки. В работе используется фемтосекундный лазер TiF-DP (Авеста-проект, Россия)  $\lambda = 770 - 830$  нм,  $f = 80$  МГц,  $\tau = 50$  фс,  $P_{\max} = 250$  мВт. Для фокусировки лазерного излучения использовался планарный микрообъектив 20 X, с NA = 0.4 и EFL = 9 мм, обеспечивающий разрешение  $\sim 1$  мкм и глубину резкости  $\sim 5$  мкм. Для обеспечения точной фокусировки в оптическую систему установлена цифровая камера с тубусной линзой с настраиваемым увеличением.

В качестве прозрачного оптического материала используется полимерная или пористая стеклянная матрица, насыщенная прекурсором благородного металла: металлоорганическим соединением серебра  $\text{Ag}(\text{hfac})\text{COD}$  или золота  $\text{HAuCl}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ . При облучении фемтосекундным лазерным излучением происходит нелинейное (двухфотонное) поглощение света молекулами прекурсора, приводящее к их фоторазложению и высвобождению атомов металла, формирующих наночастицы. Далее под воздействием лазерного поля и возникающих градиентов температуры, концентрации частиц и показателя преломления материала происходит самоорганизация наночастиц в различные пространственные микроструктуры.

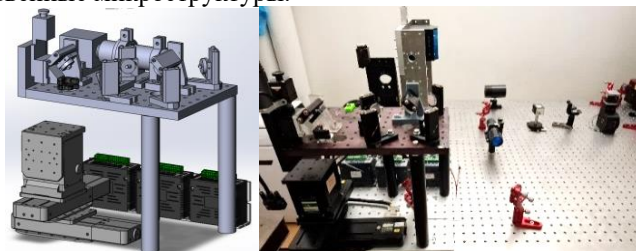


Рис. 1. Трёхмерная модель «Цифровой двойник» (слева) и фотография (справа) собранной экспериментальной установки

#### Список литературы

1. Каленский А.В., Звеков А.А. и др. // Оптика и спектроскопия. 2015. V. 118. P. 1012-1021.
2. Klimov V.I. // MRS Bull. 2015.
3. Joudeh N., Linke D. // Journal of Nanobiotechnology. 2022. V. 20. P. 262.

М.Г. ФЕДОТКИН, Е.Н. ТЕЛЬМИНОВ, Т.А. СОЛОДОВА,  
Ш.Т. БЕРДЫБАЕВА, Р.М. ГАДИРОВ<sup>1</sup>

*Томский государственный университет*

<sup>1</sup>*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники*

## **ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В ОРГАНИЧЕСКИХ АКТИВНЫХ ВОЛНОВОДАХ**

В работе представлены результаты исследования активных планарных волноводов, допированных красителем хромен-3. Исследованы динамика сужения спектральных линий генерации и пороговые характеристики по уровню накачки. Показано наличие оптимальной толщины волноводного слоя ПММА, допированного хроменом-3. Получено насыщение полуширины спектральной линии генерации не зависимо от толщины одномодового планарного активного волновода.

M.G. FEDOTKIN, E.N. TEL'MINOV, T.A. SOLODOVA,  
S.T. BERDYBAEVA, R.M. GADIROV<sup>1</sup>

*National Research Tomsk State University*

<sup>1</sup>*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*

## **LASING IN AN ORGANIC ACTIVE WAVEGUIDE**

This work presents the results of a study on active planar waveguides based on a PMMA matrix doped with Chromene-3 dye. The dynamics of spectral line narrowing and the threshold pump power characteristics of these waveguides were studied. An optimal thickness of the PMMA doped with Chromen-3 waveguide layer was identified. Additionally, saturation of the spectral linewidth was achieved, independent of the thickness in a single-mode PMMA-based planar active waveguide.

В связи с интенсивным развитием фотонных интегральных схем (ФИС), находящихся широкий спектр применений, становится актуальным использование красителей в сочетании с полимерами в виде тонкоплёночных структур как источники когерентного излучения видимого диапазона длин волн. Такие волноводные структуры могут использоваться, например, в оптоэлектронике в качестве различных датчиков.

Особенность лазерно-активных органических волноводов, в отличие от пассивных, состоит в том, что в активных волноводах одновременно с генерацией излучения происходит формирование и распространение

лазерного излучения в виде волноводных мод, которые представляют собой пространственное распределение оптической энергии. При попеременном отражении от двух границ планарного волновода световой волны в результате интерференции в волноводе по аналогии с резонатором Фабри–Перо образуется стоячая волна. Сама структура волновода направляет и ограничивает распространение лазерного излучения, определяя его модовый состав.

Цель работы – создание активного планарного волновода с заданными параметрами и их оптимизация; получение лазерной генерации в нем; изучение особенностей возникновения и распространения лазерного излучения в них (спектрально-люминесцентные и генерационные характеристики). В экспериментах реализована поперечная схема возбуждения. Накачка производилась второй гармоникой YAG-Nd<sup>3+</sup> лазера LQ-215 (532 нм). Планарный волновод представлял собой трёхслойную структуру, состоящую из матрицы полиметилметакрилата (ПММА), допированной красителем хромен-3, согласующего слоя из гидролизованного тетраэтоксисилана и стеклянной подложки размером 25 x 25 мм. Геометрические размеры активного волновода определяются толщиной плёнки ПММА и геометрическими размерами пучка накачки (полевой диафрагмой), которые в поперечном сечении составляли 10 x 0,5 мм.

В работе выявлена оптимальная толщина волноводного слоя ПММА, содержащего краситель хромен-3, равная 1,2 мкм, при которой достигается минимальное значение пороговой плотности мощности накачки. Наблюдается насыщение полуширины спектральной линии генерации 9 нм не зависимо от толщины планарного активного волновода в одномодовом режиме.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. (проект № FEWM-2024-0001).

Н.Р. ЛЕБЕДЕВ<sup>1,2</sup>, Е.О. ЕПИФАНОВ<sup>2</sup>, Н.В. МИНАЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

<sup>2</sup>Институт фотонных технологий НИИЦ «Курчатовский институт», Троицк

## **УВЕЛИЧЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ДВУХФОТОННОЙ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ И ЕЁ АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ НА ОТЕЧЕСТВЕННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЕ**

Представлена установка двухфотонной полимеризации, собранная на отечественной компонентной базе. Описаны оптическая схема и проведённые эксперименты, подтверждающие работоспособность и возможность повышения производительности технологии.

N.R. LEBEDEV<sup>1,2</sup>, E.O. EPIFANOV<sup>2</sup>, N.V. MINAEV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

<sup>2</sup>Institute Photon Technologies, of NRC «Kurchatov Institute», Troitsk

## **INCREASING THE PERFORMANCE OF TWO-PHOTON POLYMERIZATION TECHNOLOGY AND ITS HARDWARE IMPLEMENTATION BASED ON DOMESTIC COMPONENTS**

A two-photon polymerization setup assembled using components manufactured in Russia is presented. The optical scheme and conducted experiments are described, confirming the system's operability and the potential for enhanced production performance.

Двухфотонная полимеризация – аддитивная технология формирования трёхмерных полимерных структур с микронными и субмикронным разрешением [1]. Она основана на нелинейном процессе двухфотонного поглощения, при котором фотоинициатор одновременно поглощает два фотона и запускает полимеризацию. Реакция протекает только в фокусе лазерного излучения, что позволяет создавать объёмные структуры высокой точности без послойной печати [2].

Технология широко используется в микрооптике, биомедицине и микроэлектронике [3], однако её производительность ограничена скоростью перемещения перетяжки пучка. Для повышения скорости предлагается применять фемтосекундные лазеры с высокой частотой следования импульсов (до 2 ГГц) и акустооптические двухкоординатные дефлекторы, обеспечивающие быстрое безынерционное сканирование по плоскости XY.

Была разработана и собрана оригинальная установка двухфотонной полимеризации на отечественной компонентной базе (рис. 1). Оптическая схема включает фемтосекундный лазер ТЕМА-100 (525 нм, 200 фс, 70 МГц, производство Авеста, Россия), гальваносканирующую головку LScanH (производство АТЕКО-ТМ, Россия), планарный микроскопический объектив  $20 \times$  с  $NA = 0,4$  и моторизированный трёхкоординатный стол. Управление мощностью реализовано с помощью поляризационного светоделителя и вращающейся полуволновой пластинки; в роли высокоскоростного затвора использован акустооптический модулятор. Система наблюдения основана на цифровой камере с регулируемой оптикой и красной подсветкой.

Проведена юстировка установки и исследована зависимость качества структур от параметров лазерного пучка (рис. 2). В качестве материала использовалась акрилатная фотополимерная смола с дополнительным фотоинициатором. Оптимальные режимы позволяют получать стабильные микронные структуры при мощности около 7 мВт, скорости сканирования  $\sim 17$  мм/с и плотности заливки  $\sim 2000$  линий/мм. Также был интегрирован и экспериментально проверен в работе акустооптический дефлектор.

Результаты подтверждают работоспособность установки и её пригодность для задач трёхмерной микропечати. В дальнейшем планируется исследование режимов работы с акустооптическим дефлектором и использование лазера с частотой импульсов свыше 2 ГГц для существенного увеличения скорости печати и общей производительности системы.

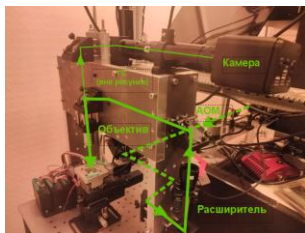


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

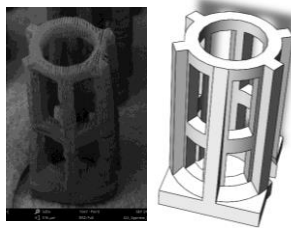


Рис. 2. Пример полученных микроструктур (слева – фото с СЭМ, справа – цифровая модель)

#### Список литературы

1. Jian B., et al. Two-photon polymerization-based 4D printing and its applications // International Journal of Extreme Manufacturing. 2023. V. 6. No. 1. P. 0120.
2. Zhou X., Hou Y., Lin J. A review on the processing accuracy of two-photon polymerization // Aip Advances. 2015. V. 5. No. 3.
3. I-Tamer A., Hinze U., Chichkov B.N. Two-photon polymerization in optics, microfluidics, and biomedicine // Handbook of Laser Micro- and NanoEngineering. Springer, 2021. P. 1691-1735.

Д.А. ЧАБУРКИН<sup>1,2</sup>, С.П. КОТОВА<sup>1,2</sup>, А.С. СОФЬИН<sup>3</sup>,  
А.В. НЕУПОКОЕВА<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

<sup>2</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева

<sup>3</sup>Самарский государственный медицинский университет

## **ФАЗОВАЯ ЗАДЕРЖКА ДЕГИДРАТИРОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ ПЛАЗМЫ КРОВИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАБОЛЕВАНИЙ НЕЙРОДЕГЕНЕРАТИВНОГО ХАРАКТЕРА**

Предложен новый метод диагностики рассеянного склероза, основанный на анализе фазовой задержки света в дегидратированных образцах плазмы. Классификация данных с помощью логистической регрессии показала точность 71 % и чувствительность 87,5 %, что подтверждает потенциал подхода для раннего выявления нейродегенеративных заболеваний.

D.A. CHABURKIN<sup>1,2</sup>, S.P. KOTOVA<sup>1,2</sup>, A.S. SOFIN<sup>3</sup>,  
A.V. NEUPOKOEVA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Samara Branch of Lebedev Physical Institute of the RAS

<sup>2</sup>Samara National Research University

<sup>3</sup>Samara State Medical University

## **PHASE DELAY OF DEHYDRATED BLOOD PLASMA SAMPLES FOR DIAGNOSTICS OF NEURODEGENERATIVE DISEASES**

A novel method for diagnosing multiple sclerosis has been developed, based on the analysis of light phase retardation in dehydrated plasma samples. Classification of the data using logistic regression demonstrated an accuracy of 71 % and a sensitivity of 87.5 %, confirming the potential of this approach for the early detection of neurodegenerative diseases.

Нейродегенеративные заболевания (НДЗ), такие как рассеянный склероз (РС), представляют серьезную медико-социальную проблему. Их ранняя диагностика затруднена, поскольку классические методы выявляют патологию лишь на стадии необратимых изменений [1]. В этой связи актуальным является поиск новых биомаркеров в легкодоступных биологических жидкостях, в частности, в плазме крови.

Перспективным направлением является анализ дегидратированных структур биожидкостей. В данной работе исследовалась количественная характеристика таких образцов — фазовая задержка (ФЗ) света,



прошедшего через дегидратированную плазму. Образцы были изготовлены в стандартизированных условиях (Самарский филиал ФИАН) [2]; пример структуры в поляризованном свете показан на рис. 1.

Измерения ФЗ проводились на визуализаторе фазового сдвига Thorlabs LCC7201B. На 2D-распределениях ФЗ выделялись срезы значений по краевой области образца (по 600 значений на срез). После усреднения внутри групп (рис. 2) значимых различий между усреднёнными срезами выявлено не было, несмотря на разный пространственный период в исходных распределениях. Для оценки диагностического потенциала метода была проведена бинарная классификация исходных срезов методом логистической регрессии. Модель обучалась на 70 % данных, валидация проводилась на 30 %. Точность (ассигасу) классификации составила 71 %, чувствительность (recall) – 87,5 %.

Таким образом, предложенная методика анализа фазовой задержки открывает возможности для ранней диагностики НДЗ и может найти применение в клинической практике.

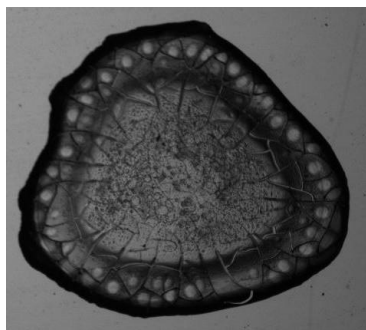


Рис. 1. Изображение дегидратированной структуры плазмы крови человека в поляризованном свете

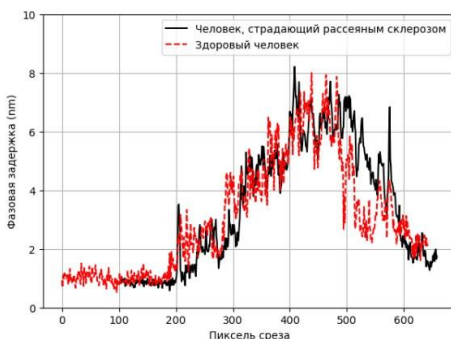


Рис. 2. Графики зависимости фазовой задержки от координаты (пикселя) для двух выборок. Сплошная линия – пациент с РС, точечная – здоровый

#### Список литературы

1. Murray T.J. // BMJ. 2006. V. 332 (7540). P. 525-527.
2. Chaburkin D.A., Kotova S.P., Devyatkin A.A., Iskhakova A.V. // Journal of Biomedical Photonics & Engineering. 2025. V. 11 (4). P. 040302.

Н.Х. ЧИНЬ<sup>1</sup>, В.Д. ВЛАСЕВИЧ, М.П. ПАТАПОВИЧ

*Белорусская государственная академия связи, Минск*

<sup>1</sup>*Университет Винь, Ханой, Вьетнам*

## **ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ВОЛОС ЧЕЛОВЕКА С ПОМОЩЬЮ СДВОЕННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ**

Показана возможность изучения элементного состава биообразцов методом лазерного спектрального анализа. Для получения эмиссионных спектров использовался двухимпульсный многоканальный спектрометр LSS-1. Результаты, полученные экспериментальным путём кратко обсуждены.

N.H. TRINH<sup>1</sup>, V.D. ULASEVICH, M.P. PATAPOVICH

*Belarusian State Academy of Communications, Minsk*

<sup>1</sup>*Vinh University, Hanoi, Vietnam*

## **STUDYING THE ELEMENTAL COMPOSITION OF HUMAN HAIR USING DOUBLE LASER PULSES**

The feasibility of studying the elemental composition of biological samples using laser spectral analysis is demonstrated. An LSS-1 dual pulse multichannel spectrometer was used to obtain emission spectra. The experimental results are briefly discussed.

В настоящее время актуальным является вопрос влияния макро- и микроэлементов на состояние здоровья человека и функционирование организма. Следовательно, при возникновении многих патологий возникает дисбаланс в распределении этих физиологически значимых элементов в биоматериалах, причём клинически идентифицировать воздействие окружающей среды в конкретный момент и на конкретного человека не всегда представляется возможным [1].

Для изучения состава биообразцов с помощью лазерного двухимпульсного спектрометра LSS-1 были созданы аналитические методики качественного и количественного анализа элементного исследуемых образцов. Источником возбуждения плазмы является двухимпульсный неодимовый лазер с возможностью регулирования энергии накачки, временного интервала между импульсами, числом воздействующих лазерных импульсов и параметром расфокусировки [2]. Кроме того, одной из важных задач является выбор аналитических линий химических элементов и подбор оптимальных условий работы. В качестве

примера, на рис. 1 и 2, приведены внешний вид биообъекта (волосы человека) после серии десяти воздействующих сдвоенных лазерных импульсов и фрагмент полученного спектра, иллюстрирующий наличие кальция в составе исследуемого образца. При этом энергия накачки лазера составляла 16 Дж, межимпульсный интервал – 8 мкм, а параметр расфокусировки равнялся 0 мм (сфокусированное излучение).

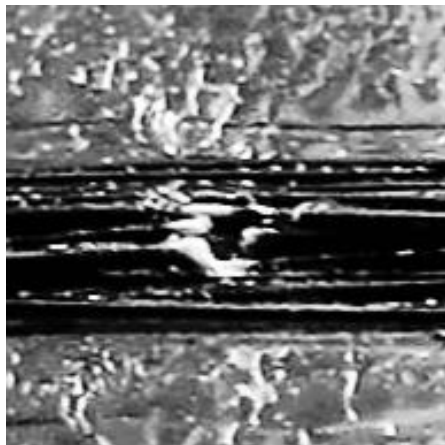


Рис. 1. Фотография исследуемого биообразца

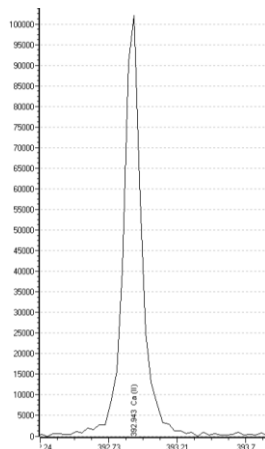


Рис. 2. Фрагмент спектра

Полученные данные демонстрируют возможность установления элементного состава биообразцов для дальнейшего их изучения и использования, что может помочь проводить диагностику и лечение на начальных стадиях развития болезни.

#### *Список литературы*

1. Нагорная Н.В. и др. // Междунар. вестн. мед. 2008. Т. 1. № 3-4. С. 209-215.
2. Чинь Н.Х., Фадаиян А.Р., Зажогин А.П. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2011. Вып. 3. С. 259-263.

С.Р. ЗУБАРЕВА, А.Ю. ЗЮБИН, И.Г. САМУСЕВ

*Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград*

## **МЕТОД УПОРЯДОЧИВАНИЯ И ОБРАБОТКИ СПЕКТРОВ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕИВАНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**

В представленной работе проведено исследование спектров комбинационного рассеивания тромбоцитов человека 401 образцов. Разработанная программа показала эффективность в быстрой обработке спектров, подготовкой массива данных для машинного обучения. С помощью алгоритмов машинного обучения было улучшено качество спектров. Показано, что данный метод позволяет быстро и без потери информации получать спектр многокомпонентных объектов с высоким соотношением сигнал/шум.

S.R. ZUBAREVA, A.Yu. ZYUBIN, I.G. SAMUSEV

*Immanuel Kant Baltic University, Kaliningrad*

## **METHOD FOR ARRANGING AND PROCESSING COMBINATION DISSEXING SPECTRA OF MULTICOMPONENT OBJECTS USING MACHINE LEARNING**

In the presented paper, the Raman scattering spectra of 401 human platelet spectra were studied. The developed program showed effectiveness in fast processing of spectra and preparing an array for machine learning. The quality of the spectra was improved using machine learning. It was shown that this method allows for the rapid and lossless acquisition of high-quality S/N ratio for spectra of multi-component objects.

Спектроскопия комбинационного рассеяния света – это мощный аналитический инструмент для индикации молекулярного состава. Его главное преимущество – неинвазивное изучение объектов в реальном времени. Однако в случае многокомпонентных объектов спектры становятся ненасыщенными перекрывающимися полосами, а фоновая составляющая может маскировать слабые значимые пики. Для решения этой проблемы всё чаще применяют методы машинного обучения, способные эффективно обрабатывать спектральные данные, выявлять скрытые закономерности и повышать точность интерпретации.

Разработанная программа показала эффективность в быстрой обработке спектров, удаление базовой линии с помощью алгоритма

Asymmetrical reweighted penalized least squares smoothing [1]. Главные преимущества – полная автоматизация, сохранение формы пиков. Далее из всех обработанных спектров был сформирован большой массив данных, в котором каждый спектр представлял собой одномерный массив.

Для автоматического сглаживания и улучшения качества спектров был применён метод ансамблевого обучения – Random Forest Regressor. Подход основан на использовании локальных оконных признаков, что позволяет модели эффективно различать шум и полезный сигнал, сохраняя при этом структуру пиков. В отличие от традиционных фильтров Random Forest обучается на множестве спектров, выявляя нелинейные зависимости между соседними точками. Это обеспечивает более адаптивное сглаживание, особенно в областях с высокой вариативностью. Результаты обработки 401 спектра показали значительное улучшение отношения сигнал/шум до 1293.88, что свидетельствует о высокой эффективности метода в подавлении шума без потери информативности. Кроме того, алгоритм успешно сохранил все основные пики. Ширина пика в  $23.8 \text{ см}^{-1}$  указывает на то, что модель не приводит к чрезмерному расширению пиков. Данный подход согласуется с работами, где Random Forest демонстрирует высокую устойчивость к шуму и способность к обработке спектральных данных [2].

Для повышения качества спектров была применена методика изоляции аномалий (Isolation Forest). Этот алгоритм, предложенный [3], эффективно выявляет выбросы в многомерных данных, не требуя предположений о распределении. Он позволил автоматически исключить 4 аномальных спектра из 401, что повысило качество усреднённого сигнала. После удаления аномалий отношения сигнал/шум увеличился с 1293.88 до 1414.87, что соответствует улучшению на 9.3 %. Это подтверждает, что даже небольшое количество низкоразрешённых спектров может существенно деградировать результат усреднения. Метод Isolation Forest особенно ценен тем, что работает без необходимости ручной настройки, что делает его идеальным для обработки больших массивов данных. Таким образом, комбинация Isolation Forest и Random Forest представляет собой мощный и полностью автоматизированный конвейер обработки спектров комбинационного рассеивания.

#### *Список литературы*

1. Baek S.J. et al. Baseline correction using asymmetrically reweighted penalized least squares smoothing // Analyst. 2015. V. 140. No. 1. P. 250-257.
2. Breiman L. Random forests // Machine learning. 2001. V. 45. No. 1. P. 5-32.
3. Iu F.T., Ting K.M., Zhou Z.H. Isolation forest // 2008 VIII IEEE International Conference on Data Mining. IEEE, 2008. P.413-422.

Н.А. РЯБОВ<sup>2</sup>, П.В. ШУЛЕПОВ<sup>2</sup>, Л.Т. ВОЛОВА<sup>2</sup>,  
Е.В. ТИМЧЕНКО<sup>1,2</sup>, П.Е. ТИМЧЕНКО<sup>1,2</sup>, С.С. ИВАНОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева

<sup>2</sup>Самарский государственный медицинский университет

## **ИДЕНТИФИКАЦИЯ КОЛЛАГЕНСОДЕРЖАЩЕГО ГЕЛЯ В СОСТАВЕ ЭНДОПРОТЕЗОВ СЕТОК С ПОМОЩЬЮ РАМАНОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ**

Приведены результаты экспериментов спектрального анализа состава эндопротезов сеток с помощью рамановской спектроскопии. Полученные результаты расширяют возможности контроля качества коллагенсодержащих покрытий при производстве хирургических сеток и обосновывают перспективность их клинического применения для снижения риска послеоперационных осложнений.

N.A. RYABOV<sup>2</sup>, P.V. SHULEPOV<sup>2</sup>, L.T. VOLOVA<sup>2</sup>,  
E.V. TIMCHENKO<sup>1,2</sup>, P.E. TIMCHENKO<sup>1,2</sup>, S.S. IVANOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara National Research University

<sup>2</sup>Samara State Medical University

## **IDENTIFICATION OF COLLAGEN-CONTAINING GEL IN MESH ENDOPROSTHESES USING RAMAN SPECTROSCOPY**

The results of experiments on spectral analysis of the composition of mesh endoprostheses using Raman spectroscopy are presented. The obtained results expand the possibilities for quality control of collagen-containing coatings in the production of surgical meshes and substantiate the potential for their clinical use in reducing the risk of postoperative complications.

Грыжи передней брюшной стенки занимают лидирующее место в структуре хирургических заболеваний. «Золотым стандартом» их лечения является герниопластика с использованием синтетических сетчатых имплантатов, что позволяет значительно снизить частоту рецидивов. Однако ни один из существующих протезов не является идеальным с точки зрения биосовместимости. Реакция организма на инородное тело часто приводит к развитию таких осложнений, как хроническое воспаление, образование сером, избыточный фиброз и хронический болевой синдром, что снижает качество жизни пациентов.

Использование коллагенсодержащего гидрогеля в качестве биопокрытия синтетических протезов, представляет собой перспективное направление, позволяющее снизить риски осложнений и повысить эффективность хирургического лечения [1, 2].

Важной задачей в данном направлении является идентификация гелей в составе данного материала, что в дальнейшем позволит оценить эффективность интеграции гелей в ткани реципиента.

Целью работы была идентификация коллагенсодержащего геля на имплантатах с помощью рамановской спектроскопии.

В качестве исследуемых эндопротезов использовались синтетические сетки фирмы ООО «Линтекс» (марок «Эслан» и «Унифлекс»), которые заполнялись коллагенсодержащим гелем.

Все исследуемые образцы исследовались с помощью специализированного рамановского стенда (длина волны излучения 785 нм и мощность излучения 300 мВт) в 10 исследуемых точках. Подробное описание экспериментального стенда приведено в работе [3]. Обработка полученных рамановских спектров была выполнена в программе Mathematica, на основе ресурса «Ramantool v.1.0.175». Нормализация спектров КР проведена методом Standart normal variate (SNV).

В результате проведенных исследований была идентифицирована линия КР  $\sim 924 \text{ см}^{-1}$  (C-C, praline ring (collagen assignment)), соответствующая наличию коллагенсодержащего геля в составе эндопротезов сеток фирмы ООО «Линтекс». Установлено, что наибольшая интенсивность данной линии наблюдается в сетках марки «Унифлекс».

Таким образом, результаты исследования свидетельствуют о применимости рамановской спектроскопии для достоверной идентификации лиофилизированного коллагенсодержащего гидрогеля в составе сетчатых эндопротезов.

#### *Список литературы*

1. Modification of collagen formation using supplemented mesh materials. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10029-006-0148-5>
2. Collagen-coated vs noncoated low-weight polypropylene meshes in a sheep model for vaginal surgery. A pilot study. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00192-006-0176-9>
3. Timchenko P.E., Timchenko E.V., Volova L.T., Zybin M.A., Frolov O.O., Dolgushov G.G. Optical Assessment of Dentin Materials // Optical Memory and Neural Networks. 2020. V. 29. No. 4. P. 354-357.

Ю.В. ВОЙТЕШОНОК, Д.В. ШИТЦ

*Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград*

## **СВЕТОДИОДНАЯ ЛАМПА ДЛЯ УФ- В ФОТОТЕРАПИИ КОЖНЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ**

Приведены результаты разработки и апробации светодиодной УФ-В лампы для лечения псориаза.

U.V. VOYTESHONOK, D.V. SCHITZ

*Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad*

## **LED LAMP FOR UV PHOTOTHERAPY OF SKIN DISEASES**

The results of the development and testing of an LED UV-B lamp for the treatment of psoriasis are presented.

УФ-В (ультрафиолетовый диапазон В, 315 - 280 нм) излучение имеет доказанную эффективность при лечении дерматологических заболеваний [1]. В качестве источника излучения обычно применяются эксимерные лазеры или люминесцентные ртутные лампы низкого давления. К недостаткам первых относится малая площадь излучающей поверхности (апертура не превышает 2 x 2 см), большие габариты и необходимость обслуживания, последние обладают зависимостью их мощности излучения от температуры колбы, а значит низкой точностью установленной дозы УФ-В излучения [2, 3].

Целью разработки данного устройства является устранение этих недостатков при помощи использования светодиодной матрицы, обеспечивающей равномерную плотность излучения.

Наиболее часто в качестве полупроводникового материала для УФ-светодиодов используются вариации III-нитридных полупроводников, к которым относятся нитрид галлия (GaN), нитрид галлия алюминия (AlGaIn) и нитрид алюминия (AlN) [4]. Состав материалов может изменять длину волны излучения в зависимости от соотношения и используемого материала. Например, сообщается, что УФ-светодиод из AlN испускает УФ-излучение с длиной волны 210 нм, тогда как УФ-светодиод из AlGaIn испускает излучение от 210 до 365 нм в зависимости от соотношения AlN и GaN [5].

Разработанная лампа основана на 16 серийно производимых УФ-В светодиодах (рис. 1 и 2) с плотностью мощности на облучаемой



поверхности  $P_{уд} = 5 \text{ мВт/см}^2$ . Выходная апертура лампы имеет размер  $86 \times 86 \text{ мм}$ . Светодиодная матрица защищена кварцевым стеклом марки «КВ» толщиной 2 мм с пропусканием излучения на длине волны 308 нм 98 %.

Апробация прибора была проведена на 13 мужчинах (54,2 %) и 11 женщинах (44,8 %). Возраст больных: от 21 до 48 лет (среднее значение – 34,2 года). По результатам апробации разработанных УФ-В ламп, было заключено, что разработанные медицинские изделия имеют показания при лечении кожного псориаза, псориаза ногтей, витилиго, экземы, красного плоского лишая, атопического дерматита, фолликулярный гиперкератоз, болезнь Дарье, травматические эрозии и эксфолиации [6].

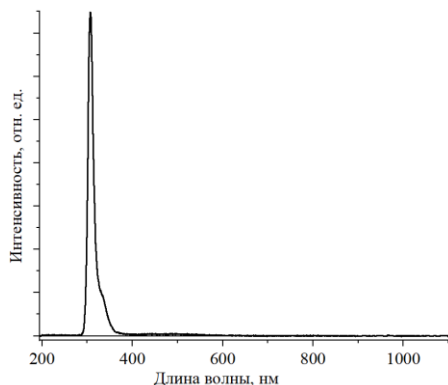


Рис. 1. Спектр излучения светодиодной УФ-В лампы

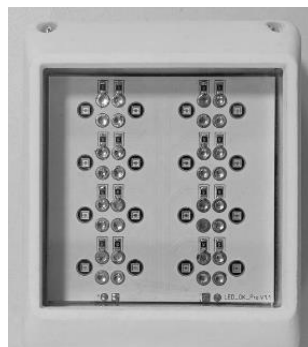


Рис. 2. Светодиодная матрица УФ-В лампы

#### Список литературы

1. Parrish JA, Jaenicke KF. Action spectrum for phototherapy of psoriasis // *J Invest Dermatol*. 1981. V. 76 (5). P. 359-362.
2. Philips lamps for Phototherapy treatment. Information booklet. Date of release: AUG 2012 / BASE - 3222 635 67128.
3. Schatloff D.H., Altbir C.R., Valenzuela F. The role of excimer light in dermatology: a review // *An Bras Dermatol*. 2024 V. 99 (6). P. 887-894.
4. Sholtes K.A., Lowe K., Walters G.W., Sobsey M.D., Linden K.G., Casanova L.M. Comparison of ultraviolet light-emitting diodes and low-pressure mercury-arc lamps for disinfection of water // *Environmental Technology*. 2016. V. 37 (17). P. 2183-2188.
5. Song K., Mohseni M., Taghipour F. Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) for water disinfection: A review. // *Water Research*. 2016. V. 94. P. 341-349.
6. Шитц Д.В., Торшина И.Е., Некрасова Н.В., Бусько Т.М. Опыт применения эксимерной лампы, оснащённой системой контроля UVB дозы, в дерматологии // *Biomedical Photonics*. 2020. V. 9. No. 1. P. 21-26.

Ю.А. ЧУРСИНА<sup>1,2</sup>, А.Н. ЕГОРОВ<sup>1,2</sup>, Д.И. АШИХМИН<sup>2</sup>,  
А.С. ШАЛЕНОВ<sup>1,2</sup>, Н.В. МИНАЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

<sup>2</sup>Институт фотонных технологий НИЦ «Курчатовский институт», Троицк

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДА И ЕГО АППАРАТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ДЛЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО ПЕРЕНОСА ЖИВЫХ КЛЕТОК СПОР И ФРАГМЕНТОВ МИЦЕЛИЯ ГРИБОВ**

Разработан метод лазерно-индуцированного переноса, адаптированный для работы с живыми клетками спор и фрагментами мицелия грибов. Для его реализации была разработана и создана установка, проектирование которой выполнялось с использованием подхода по созданию цифрового двойника. Проведена экспериментальная проверка и оценка эффективности метода переноса.

J.A. CHURSINA<sup>1,2</sup>, A.N. EGOROV<sup>1,2</sup>, D.I. ASHIKHMIN<sup>2</sup>,  
A.S. SHALENOV<sup>1,2</sup>, N.V. MINAEV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

<sup>2</sup>Institute Photon Technologies, of NRC «Kurchatov Institute», Troitsk

## **DEVELOPMENT OF A METHOD AND ITS HARDWARE IMPLEMENTATION FOR HIGHLY EFFICIENT LASER-INDUCED TRANSFER OF LIVE FUNGAL SPORES AND MYCELIAL FRAGMENTS**

A method for laser-induced forward transfer (LIFT) of live fungal spores and mycelial fragments was developed. An experimental setup was created and developed with the aid of a digital twin. The method was experimentally tested, and its effectiveness was evaluated.

Лазерная биопечать представляет собой перспективное направление для работы с живыми микробиологическими объектами, такими как клеточные культуры, клеточные агрегаты и микроорганизмы.

Целью данной работы является разработка метода лазерно-индуцированного переноса живых клеток, адаптированного под задачи микологии – манипуляции с живыми клетками спор и клетками мицелия грибов. Для его реализации была создана экспериментальная установка с использованием подхода цифрового двойника и проведена последующая оценка эффективности метода.

Прототип установки, представленный на рис. 1, был создан с применением систем цифрового проектирования и аддитивных технологий. В её основе используется импульсный волоконный лазер YLPM-1-4x200-20-20 (ООО «ВПП Лазеруан», Россия) с  $\lambda = 1064$  нм,  $f = 1.6 - 1000$  кГц,  $P_{\max} = 20$  Вт и  $\tau = 4 - 200$  нс. Оптическая схема установки включает несколько ключевых компонентов. Лазерное излучение от источника последовательно отражается системой диэлектрических зеркал и вводится в планарный микрообъектив 2.5 х с числовой апертурой  $NA = 0.08$ , рабочим расстоянием  $WD = 11.2$  мм и эффективным фокусным расстоянием  $EFL = 72$  мм. Оптическая система обеспечивает получение пятна лазерного излучения диаметром около 21 мкм в перетяжке. Для точного контроля положения плоскости фокусировки и наблюдения за процессом в систему интегрирована скоростная и цифровая камера с тубусной линзой, имеющей настраиваемую кратность до 8 х.

Принцип работы установки на рис. 2 основан на методе лазерноиндуцированного переноса, при котором импульс лазера, фокусируясь на тонкоплёночном титановом поглотителе, вызывает образование парогазового пузыря, выталкивающего микрообъём суспензии клеток на акцепторную подложку для обеспечения их точного пространственного переноса [1 - 3].

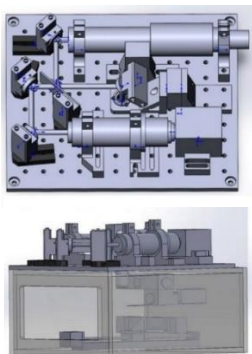


Рис. 1. Система цифрового проектирования

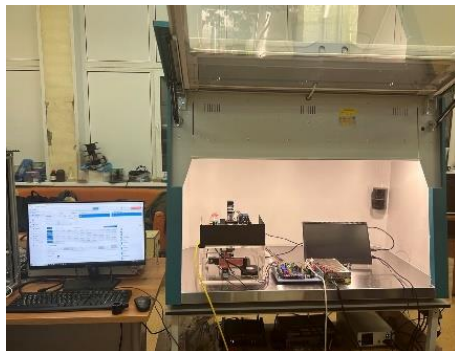


Рис. 2. Экспериментальная установка

#### *Список литературы*

1. Antoshin A.A., et al. // Bioprinting. 2019. V. 15. P. e00052.
2. Yusupov V., et al. // International Journal of Bioprinting. 2020. V. 6 (3). P. 271.
3. Riester D., et al. // Journal of Laser Micro Nanoengineering. 2016. V. 11 (2). P. 199.

К.А. ХАМИНА<sup>1</sup>, Е.В. ТИМЧЕНКО<sup>1,2</sup>, П.Е. ТИМЧЕНКО<sup>1,2</sup>,  
И.В. БАЖУТОВА<sup>2</sup>, Д.Г. ГЛУБОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева

<sup>2</sup>Самарский государственный медицинский университет

## **РАМАНОВСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ БЕДРЕННОЙ ЧАСТИ КОСТИ ПРИ ФЛЕГМОНЕ**

В работе представлены результаты экспериментов по исследованию состояния бедренной части кости при флегмоне с помощью метода спектроскопии комбинационного рассеяния. В результате проведённых исследований с помощью Рамановской спектроскопии были показаны изменения в компактном веществе костной ткани бедренной кости человека при флегмоне.

К.А. KHAMINA<sup>1</sup>, E.V. TIMCHENKO<sup>1,2</sup>, P.E. TIMCHENKO<sup>1,2</sup>,  
I.V. BAZHUTOVA<sup>2</sup>, D.G. GLUBOKOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samara National Research University

<sup>2</sup>Samara State Medical University

## **RAMAN SPECTROSCOPY FOR DIAGNOSIS THE CONDITION OF FEMUR PART OF THE BONE IN GANGRENE AND PHLEGMON**

This paper presents the results of experiments examining the condition of the femur in patients with phlegmon using Raman spectroscopy. The studies, conducted using Raman spectroscopy, revealed changes in the compact bone substance of the human femur in patients with phlegmon.

Актуальность работы заключается в исследовании изменений компактного вещества бедренной части кости при флегмоне с помощью рамановской спектроскопии. В литературе, на данный момент, нет однозначной информации об изменениях в костной ткани при данном заболевании. Этот вопрос имеет важное значение для проведения дополнительного лечения при флегмоне и нивелированию осложнений, касающихся костной ткани, вызванного этим заболеванием.

Цель исследования – применение рамановской спектроскопии для диагностики состояния компактного вещества бедренной части кости при флегмоне.

Объектами исследований являлись образцы компактного вещества бедренной части аллогенной кости человека обоего пола, возраста от 57 - 78 лет. Все исследуемые образцы условно были разделены на две группы: 1 – условно здоровая костная ткань (отсутствуют в анамнезе заболевания, связанные с патологией костной ткани), 2 – костная ткань реципиентов при установленном диагнозе флегмона.

В качестве основного метода исследования была использована рамановская спектроскопия, которая широко зарекомендовала себя в решении биомедицинских задач. Данный метод был реализован с помощью экспериментального стенда, включающего в себя лазерный пробник RPB-785, лазер LuxxMaster LML-785.0RB-04 (мощность 450 мВт, длина волны  $784,7 \pm 0,05$  нм) и спектрометр Shamrock sr-303i с разрешением 0,15 нм со встроенной охлаждаемой камерой DV420A-OE. Анализировались рамановские спектры в диапазоне 400 - 2200  $\text{см}^{-1}$ . Обработка данных проводилась в Wolfram Mathematica 12 и включала удаление шумов с помощью усредняющего фильтра, полиноминую аппроксимацию флуоресцентной составляющей и вычитание её из спектра для получения обработанного спектра комбинационного рассеяния.

В результате проведённых исследований с помощью рамановской спектроскопии были показаны изменения в компактном веществе костной ткани бедренной кости человека при флегмоне. Данные изменения проявляются на линиях  $\sim 432 \text{ см}^{-1}$  ( $\nu_2\text{PO}_4^{3-}$ ),  $\sim 587 \text{ см}^{-1}$  ( $\nu_4\text{PO}_4^{3-}$ ),  $\sim 957 \text{ см}^{-1}$  ( $\nu_1\text{PO}_4^{3-}$ ),  $\sim 1044 \text{ см}^{-1}$  ( $\nu_3\text{PO}_4^{3-}$ ),  $\sim 1068 \text{ см}^{-1}$  ( $\nu_1\text{CO}_3^{2-}$ ),  $\sim 1264 \text{ см}^{-1}$  (Amide III),  $\sim 1417 \text{ см}^{-1}$  ( $\text{C} \equiv \text{C}$  stretching in quinoidring),  $\sim 1443 \text{ см}^{-1}$  ( $\text{CH}_2$  deformation),  $\sim 1555 \text{ см}^{-1}$  (Amide II),  $\sim 1658 \text{ см}^{-1}$  (Amide I) и связаны с изменением минерало-органического матрикса костной ткани. Такие спектральные изменения, видимо, обусловлены диффузным распространением воспалительного характера при флегмоне, что отражается также на снижении плотности и содержании минеральных компонент костных структур.

Показана возможность рамановской спектроскопии оценивать состояние костной ткани при флегмоне. Полученные результаты позволяют скорректировать лечение больных с заболеванием флегмона с вовлечением препаратов восстанавливающих не только мягкие ткани, но и костную ткань.

А.С. ШАЛЕНОВ<sup>1,2</sup>, Н.В. МИНАЕВ<sup>2</sup>, Д.И. АШИХМИН<sup>2</sup>,  
В.И. ЮСУПОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

<sup>2</sup>Институт фотонных технологий НИЦ «Курчатовский институт», Троицк

## **ТЕХНОЛОГИЯ И АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ТОЧНОГО ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО ПЕРЕНОСА ЕДИНИЧНЫХ КЛЕТОК**

Разработан метод лазерно-индуцированного переноса, адаптированный для работы с живыми клетками крови человека. Для его реализации разработана и создана установка точной лазерной биопечати. Проведены экспериментальные исследования и выполнена оценка эффективности метода переноса.

A.S. SHALENOV<sup>1,2</sup>, N.V. MINAEV<sup>2</sup>, D.I. ASHIKHMIN<sup>2</sup>,  
V.I. YUSUPOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

<sup>2</sup>Institute Photon Technologies, of NRC «Kurchatov Institute», Troitsk

## **TECHNOLOGY AND HARDWARE COMPLEX FOR PRECISE LASER-INDUCED FORWARD TRANSFER OF SINGLE CELLS**

A method of laser-induced forward transfer (LIFT) has been developed, specifically adapted for working with live human blood cells. For its implementation, a precision laser bioprinting setup has been designed and constructed. Experimental studies have been conducted, and an assessment of the transfer method's efficiency has been performed.

Лазерная биопечать является одним из наиболее современных методов выделения единичных клеток, позволяя эффективно решать задачи микробиологии и медицины.

Целью исследования являлась разработка подхода к прецизионному выделению единичных клеток с использованием технологии прямого лазерно-индуцированного переноса по принципу «одна клетка – одна пробирка». Для реализации данного подхода была создана экспериментальная установка, разработанная с применением методов цифрового двойника, а также проведена оценка эффективности метода.

Для разработки подхода к точному выделению единичных клеток использовался итербиевый импульсный волоконный лазер YLPM-1-

4x200-20-20 (ООО «ВПГ Лазеруан», Россия) с  $\lambda = 1064$  нм,  $f = 1.6 - 1000$  кГц,  $P_{\max} = 20$  Вт с,  $\tau = 8$  нс.

Экспериментальная установка спроектирована как малогабаритная и модульная система с минимальным количеством элементов, что обеспечивает мобильность и быструю настройку. Использование различных планарных объективов позволяет формировать пятна лазерного излучения диаметром от 10 до 21 мкм в перетяжке. Комбинирование систем визуализации (цифровая и высокоскоростная камеры) позволяет осуществлять печать одиночными клетками за счёт оптического обнаружения и селективного выделения целевых клеток. Подсветка суперконтинуумным излучением может осуществляться как сверху, так и снизу.

Принцип работы установки (рис. 1) основан на методе лазерноиндуцированного переноса. Фокусировка лазерного импульса на нанометровом слое Ti приводит к образованию парогазового пузыря, который выталкивает микрообъём суспензии с единичными клетками на акцепторную подложку, обеспечивая точный пространственный перенос [1 - 3].

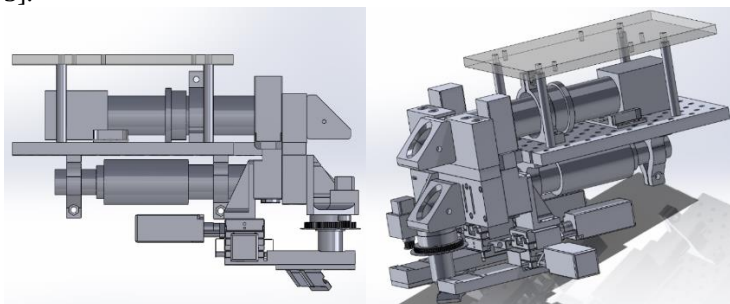


Рис. 1. Трёхмерная модель разработанной установки

*Список литературы*

1. Antoshin A.A., et al. // Bioprinting. 2019. V. 15. P. e00052.
2. Yusupov V., et al. // International Journal of Bioprinting. 2020. V. 6 (3). P. 271.
3. Bosmans C., et al. // Trends in Biotechnology. 2024. V. 42 (6). P. 739.

Д.М. ФРАНЦУЗОВА<sup>1</sup>, Е.В. ТИМЧЕНКО<sup>1,2</sup>, П.Е. ТИМЧЕНКО<sup>1,2</sup>,  
И.В. БАЖУТОВА<sup>2</sup>, Д.Г. ГЛУБОКОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева

<sup>2</sup>Самарский государственный медицинский университет

## **РАМАНОВСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ МИНЕРАЛО-ОРГАНИЧЕСКОГО СОСТАВА КОСТНОЙ ТКАНИ ЧЕЛЮСТИ ПОСЛЕ КОСТНОЙ ПЛАСТИКИ**

Приведены результаты экспериментальных исследований изменений минерало-органического состава костной ткани челюсти до и после костной пластики с помощью метода рамановской спектроскопии. В результате проведённых исследований было установлено, что после костной пластики, спектральный состав костной ткани идентичен составу костной ткани при норме.

D.M. FRANTSUZOVA<sup>1</sup>, E.V. TIMCHENKO<sup>1,2</sup>, P.E. TIMCHENKO<sup>1,2</sup>,  
I.V. BAZHUTOVA<sup>2</sup>, D.G. GLUBOKOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samara National Research University

<sup>2</sup>Samara State Medical University

## **RAMAN SPECTROSCOPY FOR ASSESSING THE MINERAL-ORGANIC COMPOSITION OF JAW BONE TISSUE AFTER BONE GRAFT**

The results of experimental studies of changes in the mineral-organic composition of jaw bone tissue before and after bone grafting using Raman spectroscopy are presented. The studies found that the spectral composition of bone tissue after bone grafting is identical to that of normal bone tissue.

В современной стоматологии значительную проблему представляют воспалительные заболевания пародонта, такие как пародонтит ведущие к деструкции костной ткани челюсти [1 - 3]. Ключевым аспектом этого патологического процесса являются биохимические изменения, затрагивающие минерально-органический состав кости, включая нарушение соотношения фосфата и карбоната в гидроксиапатите, фрагментацию коллагена и накопление маркеров воспаления. Данные изменения усложняют и порой делают невозможным установку имплантата зубов. Поэтому, зачастую стоматологи применяют остеопластику для восстановления костной ткани после удаления зуба. В тоже время остается открытым вопрос насколько костная пластика



способна восстановить костную ткань в области будущего имплантата. Для оценки восстановления костной ткани челюсти часто используют метод компьютерной томографии. Однако, данный метод является дорогостоящим и не позволяет оценить состав костной ткани. Для оценки минерало-органического состава костной ткани челюсти после костной пластики можно использовать метод Рамановской спектроскопии, который нашел широкое применение в решении медико-биологических задач.

В качестве объектов исследования выступили образцы костной ткани челюсти, полученные у пациентов до имплантации в области интактной кости, а также образцы костной ткани, полученные от тех же пациентов после проведения костной пластики.

Регистрация рамановских спектров проводилась на спектрографе Sharmrock SR-303i, оснащённом цифровой камерой ANDOR DV-420A-OE (разрешение 0.15 нм). В качестве источника возбуждения использовался полупроводниковый лазер с длиной волны 785 нм (LML-785.0RB-04) в составе оптического модуля PBL 785 мощностью до 450 мВт. Полученные спектры были обработаны с применением алгоритма Extended Multiplicative Signal Correction (EMSC) для нормализации и отфильтрованы методом Maximum Likelihood Estimation Savitzky-Golay (MLE-SG) с параметром  $\sigma = 4$  для сглаживания. Для минимизации влияния автофлуоресценции в спектрах КР использовали модифицированный алгоритм Improved Modified Multi-Polynomial Fitting (ExModPoly) с аппроксимацией полиномом восьмой степени. Обработке подвергались спектральные данные в диапазоне 450 - 1800 см<sup>-1</sup>.

В результате проведённых исследований с помощью рамановской спектроскопии было установлено, что после костной пластики, спектральный состав костной ткани идентичен составу костной ткани при норме, что свидетельствует об успешности проведённой операции.

Показано, что рамановская спектроскопия позволяет оценивать качество проведённой костной пластики.

#### *Список литературы*

1. Orekhova I.Yu. Diseases of the Periodontium // Poli Media Press, 2004. P. 218-220.
2. Kostrogina E.D. Periodontitis // Penza State University Publishing House, 2023. P. 5-85.
3. Radu C.-M. Exploring the Efficacy of Novel Therapeutic Strategies for Periodontitis // Life 2024. V. 14 (4). P. 468.

Д.С. ШУЛБАЕВА, В.В. КОСТРОМЫКИНА, Г.С. РОГОЖНИКОВ  
*РФЯЦ – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной  
физики, Саров, Нижегородская обл.*

**ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА  
СПЕКТРАЛЬНЫХ ОТПЕЧАТКОВ В ЗАДАЧАХ  
ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ  
ПО ИХ ОПТИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ**

Метод спектральных отпечатков базируется на многомерном анализе спектральных данных и предназначен для дифференцирования биологических тканей на основании выявленных различий в их оптических характеристиках. Его применение обеспечивает высокую чувствительность к структуре и функциональным особенностям тканей, что открывает новые возможности для ранней диагностики патологических изменений.

D.S. SHULBAEVA, V.V. KOSTROMYKINA, G.S. ROGOZHNIKOV  
*All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Nizhny Novgorod region*

**APPLICATION FEATURES OF SPECTRAL FINGERPRINTING  
IN PROBLEMS OF DIFFERENTIATING BIOLOGICAL  
TISSUES BY THEIR OPTICAL CHARACTERISTICS**

Spectral fingerprinting is based on the multivariate analysis of spectral data and is consigned for differentiation of biological tissues in accordance with detected differences in their optical characteristics. Its application provides high sensitivity to the structure and functional features of tissues that reveals new possibilities for early diagnosis of pathological changes.

Спектр поглощения биологической ткани представляет собой кривую, состоящую как из ровных участков, так и характерных пиков, подъёмов и спадов, что позволяет не только идентифицировать ткань по типу, но и судить о её химическом составе, а также о структурном и функциональном состоянии. Наиболее часто для анализа спектральных данных применяются обратный метод Монте-Карло и корреляционные способы по типу метода главных компонент. Представляется, что метод спектральных отпечатков более удобен для автоматизации процесса и является наиболее наглядным, особенно при использовании его в ходе процедур, связанных с востребованной и актуальной на сегодняшний день оптической биопсией [1, 2].

Данная работа посвящена адаптации метода спектральных отпечатков для применения в оптической биопсии, повышения его информативности и достижения высоких значений специфичности и чувствительности.

Как было отмечено ранее, в каждом спектре присутствуют отпечатки – «паттерны», уникальным образом характеризующие ткань и позволяющие дифференцировать ткани друг от друга. Спектр условно можно поделить на  $N$  паттернов, каждый из которых может менять свою форму и наклон относительно некоторого узла. При аппроксимации каждого паттерна некоторой кусочно-заданной функцией  $f_i(\lambda)$  они все должны находиться в связке по граничным значениям интервалов, причём в граничных областях  $[\varepsilon_{i-1}^R, \varepsilon_i^L]$ ,  $[\varepsilon_i^R, \varepsilon_{i+1}^L]$  каждого набора граничащих паттернов у функций  $f_{i-1}(\lambda)$ ,  $f_i(\lambda)$  и  $f_{i+1}(\lambda)$  должна сохраняться монотонность при каждом изменении положения узла.

Для оценки различий в спектральных отпечатках можно пользоваться методом градиентного спуска: так как направление наибольшего возрастания функции двух переменных  $\omega = f_i(\lambda, \varepsilon_i)$  характеризуется её градиентом, то, направление, противоположное градиенту, укажет путь наименьшего убывания функции.

В качестве иллюстрации применения метода спектральных отпечатков приведён график спектров поглощения (рис. 1), на котором спектр жировой ткани представлен как эталонный спектр поглощения, а липома – это данные экспериментального образца [3].

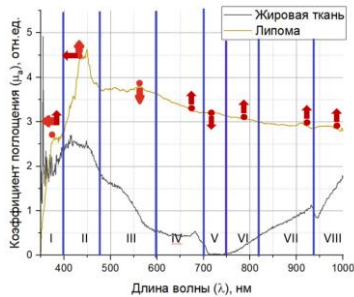


Рис. 1. Спектры поглощения жировой ткани и липомы с изображением работы метода градиентного спуска

#### Список литературы

1. Скрыбыкина А.А., Костромькина В.В., Рогожников Г.С. // Фотоника и информационная оптика. Москва, 2023.
2. Скрыбыкина А.А., Рогожников Г.С. // Ломоносов-2023. Москва, 2023.
3. Шульбаева Д.С., Клычков А.М., Рогожников Г.С. // Фотоника и информационная оптика. Москва, 2024.

П.Е. ТИМЧЕНКО<sup>1,2</sup>, А.Д. ВОЛОВ<sup>2</sup>, Л.Т. ВОЛОВА<sup>2</sup>,  
Е.В. ТИМЧЕНКО<sup>1,2</sup>, А.А. ЧЕРНУХИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева

<sup>2</sup>Самарский государственный медицинский университет

## **РАМАНОВСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТАВА ДЕИОНИЗИРОВАННОЙ ВОДЫ**

Представлены результаты применения метода спектроскопии комбинационного рассеяния для оценки чистоты деионизированной воды, применяемой в экспериментальных целях в биотехнологических лабораториях. Было установлено, что исследуемые группы деионизированной воды имеют спектральное сходство между собой и различие с водопроводной, что связано с наличием микроорганизмов в водопроводной воде.

P.E. TIMCHENKO<sup>1,2</sup>, A.D. VOLOV<sup>2</sup>, L.T. VOLOVA<sup>2</sup>,  
E.V. TIMCHENKO<sup>1,2</sup>, A.A. CHERNUKHIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara National Research University

<sup>2</sup>Samara State Medical University

## **RAMAN SPECTROSCOPY FOR ASSESSING THE COMPOSITION OF DEIONIZED WATER**

The results of applying Raman spectroscopy to assess the purity of deionized water used for experimental purposes in biotechnological laboratories are presented. It was found that the studied groups of deionized water have spectral similarities with each other and differences with tap water, which is due to the presence of microorganisms in tap water.

Для исключения неудовлетворительных результатов экспериментов, связанных с качеством воды в биотехнологических лабораториях, применяется деионизация, подразумевающая под собой удаление ионов с помощью смол, часто совмещаемое с электродиализом [1, 2]. Существующие методы контроля качества воды, такие как кондуктометрия, оценивают лишь одно вещество и не различают компоненты [3]. Другие подходы [3, 4] могут требовать длительного времени, сложной пробоподготовки и не подходят для измерений *in situ*, а также могут вызывать вторичное загрязнение [4].

В отличие от них рамановская спектроскопия зарекомендовала себя как эффективный, экспрессный и неразрушающий инструмент для определения широкого спектра критически важных примесей в воде [5].

Целью работы являлось применение спектроскопии комбинационного рассеяния для оценки состава деионизированной воды.

Эксперименты были проведены для трёх групп воды:  
1 - деионизированная вода, полученная на аппарате ДМЭ-2Б ОПТИМА,  
2 - деионизированная вода, полученная на аппарате Атлант,  
3 - водопроводная вода.

Эксперименты были реализованы с помощью экспериментального стенда, описанного в работе [6]. Установка включала диодный лазер ( $E_{\text{им}} = 150$  мДж, 785 нм, 60 с), спектрограф с камерой ( $t = -60$  °C,  $R = 0.15$  нм), рамановский пробник и ноутбук. Дальнейшая обработка спектров и статистический анализ были выполнены в программе «Raman spectroscopy tool. 1.0.9.» [6].

Дополнительно был проведён химический и микробиологический анализы исследуемых групп.

В результате проведённых исследований в области  $\sim 1660$  см<sup>-1</sup> (amid I) были установлены спектральные различия для водопроводной воды и исследуемых двух групп деионизированной воды, что связано с наличием в составе водопроводной воды различных микроорганизмов.

Далее был проведён статистический дискриминантный анализ декомпозиционных линий методом наименьших квадратов. В результате проведённого дискриминантного анализа спектров комбинационного рассеяния показано, что две исследуемые группы деионизированной воды имеют схожий спектральный состав, а также различие с водопроводной водой.

Результаты исследований были подтверждены проведённым химическим и микробиологическим анализами исследуемых групп образцов.

#### *Список литературы*

1. Mendes M., et al. // Jor. Bras. De Patol. E Med. Lab 2011. V. 47 (3). P. 217-220.
2. Arar Ö., Yüksel Ü., et al. // Desalination. 2014. V. 342. P. 16-17.
3. Stauffer M.T. // InTech. 2016. P. 406.
4. Almaviva S., Artuso F., Giardina I., Lai A., Pasquo A. // Sensors. 2022. V. 22(21). P. 1-12.
5. Li Z., Wang J., Li D. // Spectroscopy Reviews. 2016. V. 51(4), P. 313-320.
6. Timchenko P.E., Timchenko E.V., et al. // Journal of Opt. Tech. 2021. V. 88(9), P. 485-488.

Я.В. КОЛЕСНИК, С.И. ЗИМИН

*Московский технический университет связи и информатики*

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ  
РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН  
И КОМПОНЕНТОВ ВОЛС В УСЛОВИЯХ  
МОДЕЛИРОВАННОГО ОБЛУЧЕНИЯ АЭС**

Исследована радиационная стойкость оптических волокон и компонентов ВОЛС для условий АЭС. Сопоставлены стандартные Ge-легированные волокна и радиационно-стойкие волокна с нелегированной кварцевой сердцевиной и фторированной оболочкой. Оценка проведена по схеме «до/после облучения» с учётом восстановления радиационно-наведённого поглощения. Сформулированы выводы и рекомендации по применению на АЭС.

Ya.V. KOLESNIK, S.I. ZIMIN

*Moscow Technical University of Communications and Informatics*

**INVESTIGATION OF THE RADIATION RESISTANCE  
OF VARIOUS TYPES OF OPTICAL FIBERS AND FIBER-OPTIC  
COMMUNICATION LINE COMPONENTS  
UNDER SIMULATED NUCLEAR POWER PLANT IRRADIATION**

The radiation resistance of optical fibers and FOCL components for NPP conditions was investigated. Standard Ge-doped fibers were compared with radiation-hardened fibers featuring an undoped silica core and fluorinated cladding. The assessment followed a “before/after irradiation” approach, taking RIA recovery into account. Conclusions and recommendations for NPP applications were formulated.

Оптические кабели востребованы на АЭС благодаря гальванической развязке и устойчивости к электромагнитным помехам. Однако ионизирующее излучение приводит к изменению оптических свойств волокна и материалов линии, что требует обоснованного выбора как типа световода, так и конструктивных решений ВОЛС.

При гамма-облучении в кварцевом стекле формируются дефекты (центры окраски), усиливающие поглощение и повышающие затухание в рабочих окнах 1310 / 1550 нм. Наблюдаемое радиационно-наведённое поглощение (РНП) зависит от дозы и дозовой мощности, а также от температуры: при её повышении обычно ускоряется термический отжиг дефектов, и доля восстановившихся потерь возрастает; при пониженных

температурах дефекты «фиксируются» и РНП выше. Дополнительно на измеряемые потери способен влиять режим контроля, включая фотообесцвечивание под действием зондирующего сигнала.

Для сравнения выделены: телекоммуникационные одномодовые волокна с Ge-легированной сердцевинной; волокна повышенной стойкости с нелегированной SiO<sub>2</sub>-сердцевинной и фторированной оболочкой; варианты с барьерными покрытиями (например, углеродный подслои и/или полиимид), актуальные при одновременном влиянии температуры и водородсодержащей среды. Испытательная логика основана на измерении потерь до облучения, сразу после набора дозы и через интервалы времени (не менее суток-двух) для оценки восстановления. Для компонентов (коннекторы, разветвители) фиксируются не только средние значения вставочных потерь (IL), но и их разброс при повторной коммутации, так как деградация клеев и полимеров проявляется нестабильностью IL.

Стандартные Ge-легированные телеком-волокна в ближнем ИК-диапазоне, как правило, демонстрируют более высокий прирост потерь, поэтому при их применении в радиационных помещениях требуется больший энергетический запас, ограничение длины участка в зоне облучения или перенос линии в «мягкие» зоны. Волокна класса SiO<sub>2</sub> + фторированная оболочка характеризуются меньшим РНП и более предсказуемой динамикой восстановления, для прокладки в помещениях с гамма-фоном они более предпочтительны. Отдельно подчеркнуто, что слабым звеном чаще становятся не стекло, а компоненты ВОЛС: соединители, упаковка разветвителей, кабельные полимеры и компаунды могут давать рост и нестабильность IL, ухудшая энергетический баланс линии даже при использовании стойкого световода. Вывод – для радиационных зон выбирать волокна с нелегированной SiO<sub>2</sub>-сердцевинной и фторированной оболочкой; при необходимости применять барьерные покрытия; минимизировать разъёмные соединения в зоне облучения и использовать компоненты с подтверждённой стойкостью материалов; закладывать запас по мощности и регламент мониторинга (IL/OTDR) с учётом восстановления и возможных постэффектов.

#### *Список литературы*

1. Арбузов В.И. Основы радиационного оптического материаловедения: учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2008.
2. Кашайкин П.Ф. Прогнозирование радиационно-наведённого поглощения света в волоконных световодах с сердцевинной из нелегированного кварцевого стекла. Дисс. НЦВО РАН, 2019.
3. Томашук А.Л. и др. Патент РФ № 2537523; приоритет 13.09.2013; опубл. 10.01.2015.
4. Томашук А.Л. // Краткие сообщения по физике. 2018. № 12. С. 21-26.

**В.Д. ТОРУБКА**

*Кубанский государственный университет, Краснодар*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕНДЕНЦИЙ ПЕРЕХОДА НА ОБОРУДОВАНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДИТЕЛЯ В СЕТЯХ ПАКЕТНОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ**

Рассматриваются современные тенденции в области оптических сетей пакетной передачи данных, связанные с переходом на оборудование отечественного производителя. Рассмотрен гибридный подход, сочетающий аппаратные компоненты промышленного стандарта с российским программным обеспечением. Проанализированы технические возможности оборудования, опыт внедрения в сеть МТС, а также вопросы подготовки студентов для работы с отечественными телеком-решениями. Показано, что такой гибридный подход обеспечивает технологическую независимость без потери качества связи.

**V.D. TORUBKA**

*Kuban State University, Krasnodar*

## **RESEARCH OF MODERN TRENDS IN TRANSITION TO DOMESTIC EQUIPMENT IN PACKET DATA NETWORKS**

The article examines current trends in the field of optical packet data transmission networks related to the transition to domestically manufactured equipment. A hybrid approach combining industrial-standard hardware components with Russian software is considered. The technical capabilities of the equipment, implementation experience in the MTS network, as well as aspects of student training for working with domestic telecommunications solutions are analyzed. It is demonstrated that this hybrid approach ensures technological independence without compromising communication quality.

Рост трафика и геополитические риски стимулируют переход российских операторов связи на отечественное сетевое оборудование. В условиях санкций этот вопрос приобретает особую актуальность для обеспечения технической независимости и безопасности инфраструктуры передачи данных на транспортной сети провайдера.

Перспективным отечественным вендором является компания В4СОН. Данное оборудование собирается в России на основе импортного аппаратного обеспечения сетевых чипов (ASIC) и компонентов уровня Cisco и Juniper, при этом работает на полностью отечественном



программном обеспечении от операционной системы до сетевых протоколов. Такой гибридный подход обеспечивает аппаратную надёжность, сопоставимую с мировыми аналогами вендоров, и полную техническую независимость на программном уровне, включая безопасность, адаптацию и контроль всего жизненного цикла продукции. Оборудование B4COM демонстрирует продуктивность работы в реальных условиях эксплуатации. При развертывании в сетях крупных операторов связи оборудование поддерживает пропускную способностью до 3.2 Тбит/с, с оптическими интерфейсами 400G, поддерживает все основные протоколы передачи данных (IP/MPLS, Segment Routing). Система обладает развитыми функциями автоматизации и совместима с российскими платформами мониторинга сетей.

Важным преимуществом интеграции является локализация технической поддержки, инженеры компании обеспечивают круглосуточный мониторинг и оперативное реагирование на инциденты. Оборудование имеет необходимые сертификаты Минцифры и соответствует важным требованиям для использования в критической информационной инфраструктуре.

Практическим подтверждением успешности внедрения B4COM служит интеграция оборудования в сеть провайдера МТС, начавшаяся в 2023 году. К настоящему времени уже развернуто несколько тысяч узлов, а полная интеграция оборудования планируется к завершению в ближайшие годы.

Важнейшим элементом успешного перехода является подготовка квалифицированных специалистов. Вузы уже начали адаптировать учебные программы, внедряя специализированные дисциплины, включающие лабораторные практикумы для работы с отечественным оборудованием, что позволяет студентам приобретать практические навыки по работе с отечественным оборудованием, востребованные операторами связи.

Интеграция оборудования B4COM демонстрирует успешность перехода в сетях отечественного провайдера. Оборудование, сочетающее аппаратные компоненты промышленного стандарта с российским программным обеспечением, подтвердило свою состоятельность как стратегически важное решение для обеспечения технологического суверенитета. В ближайшие годы необходимо наладить полный цикл производства сетевых чипов в России и продолжать подготовку специалистов для работы с отечественными вендорами.

Ю.А. КОСОВА, К.Ш. АВТАНДИЛОВ<sup>1</sup>

*Российский университет транспорта (МИИТ), Москва*

*<sup>1</sup>Московский технический университет связи и информатики*

## **НАУКОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ ПОЛЫХ И МНОГОСЕРДЦЕВИННЫХ СВЕТОВОДОВ ДЛЯ КВАНТОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ**

Представлен анализ возможности применения многосердцевинных (MCF) и полых оптических волокон (HCF) для модернизации сетей связи железнодорожного транспорта. Показаны преимущества MCF в повышении пропускной способности и преимущества HCF в увеличении пропускной способности канала связи, снижении оптических потерь мощности и нелинейных эффектов, что делает их перспективными для высокопроизводительных и квантовых каналов.

Yu.A. KOSOVA, K.Sh. AVTANDILOV<sup>1</sup>

*Russian University of Transport (MIIT), Moscow*

*<sup>1</sup>Moscow Technical University of Communications and Informatics*

## **SCIENTOMETRIC ANALYSIS OF THE DEVELOPMENT PROSPECTS FOR HOLLOW AND MULTICORE OPTICAL FIBERS FOR QUANTUM COMMUNICATIONS**

This paper presents an analysis of the feasibility of deploying multicore fibers (MCF) and hollow-core fibers (HCF) to modernize railway communication networks. The study demonstrates the advantages of MCF for significantly increasing aggregate transmission capacity, and highlights the benefits of HCF in enhancing channel capacity while reducing optical power losses and nonlinear impairments. These features make both fiber types promising candidates for high-performance quantum communication networks.

Современная инфраструктура железнодорожного транспорта Российской Федерации в условиях развития квантовых коммуникаций и внедрения искусственного интеллекта для оптимизации процессов управления при организации перевозок требует модернизации сетей связи [1]. Традиционные одномодовые волокна стандарта G.652 достигают физических пределов по пропускной способности. В связи с этим актуальным направлением исследования является применение многосердцевинных оптических волокон (MCF – Multi-Core Fibers) и полых оптических волокон (HCF – Hollow-Core Fibers) [2, 3].

Многосердцевинные волокна (MCF) представляют собой оптические структуры с несколькими изолированными сердцевинами в одной оболочке, способствуя миниатюризации кабельной инфраструктуры, при этом обеспечивающие параллельную передачу сигналов, что позволяет MCF одновременно обслуживать критически важные системы от автоматики и телемеханики до передач данных для ИИ и квантовой связи [2].

Полые оптические волокна (HCF) имеют газонаполненную сердцевину, что снижает потери, вызванные фононным поглощением и рэлеевским рассеянием в стекле, расширяя полосу пропускания, увеличивая скорость передачи и подавляя нелинейные эффекты [3, 4]. Эти свойства делают HCF перспективной платформой для высокопроизводительных линий связи и квантовых коммуникаций [2, 3]. Для выявления исследовательских трендов использована методика наукометрического анализа [5]. Для анализа использовалась база данных Scopus. По запросу «Multi-core fiber» за 2010 – 2025 гг. собрано  $\approx 3,8$  тыс. публикаций; годовая динамика показывает устойчивый рост (среднегодовой темп  $\approx 10 - 11\%$ ). Аналогично, по выборке «Hollow-Core fiber» за 2010 – 2025 гг. проанализировано  $\approx 6,8$  тыс. публикаций, выявлен стабильный рост публикационной активности в этой области (среднегодовой темп  $\approx 8 - 10\%$ ) [5].

Исследование выявило высокие перспективы применения технологий MCF и HCF. Показано, что в инфраструктуре железнодорожного транспорта применение этих технологий позволит значительно увеличить скорость и безопасность передачи данных для процессов управления перевозками.

#### *Список литературы*

1. Евдокимова О.Г., Хайсов А.В. Основные направления цифровизации на железнодорожном транспорте // Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им.С. Попова. 2024. № 1 (79). С. 269-271.
2. Егорова О., Ерохин К., Журавлев С. и др. Применение многосердцевинных оптических волокон для квантовых сетей // Первая миля. 2022. № 8. С. 44-51.
3. Казанцев С.Ю., Автандилов К.Ш. Перспективные направляющие среды для квантовых сетей // Телекоммуникации и информационные технологии. 2025. Т. 12. № 1. С. 23-34.
4. Прямыков А.Д., Гладышев А.В., Косолапов А.Ф., Буфетов И.А. Полые световоды: современное состояние и перспективы развития // Успехи физических наук. 2024. Т. 194. № 2. С. 138-168.
5. Машковцева Л.С., Болотов Д.В., Казанцев С.Ю. и др. Наукометрический анализ публикаций по источникам одиночных фотонов для систем связи с квантовым распределением ключей // Научно-техническая информация. Серия 1: Организация и методика информационной работы. 2022. № 1. С. 22-31.

Н.Р. ГАНАКИН, А.Р. САЛЕЕВ, И.М. СИМОНОВ,  
М.А. ЯРЫГИН, С.В. ПАВЛОВ

*Московский технический университет связи и информатики*

## **ВЛИЯНИЕ ПОПЕРЕЧНОЙ ТОЧЕЧНОЙ СИЛЫ НА ПЕРЕДАЧУ СИГНАЛА ОПТОВОЛОКОННОГО КАБЕЛЯ**

В данной работе исследуется влияние поперечной точечной силы тяжести на передачу сигнала оптоволоконного кабеля. Был разработан собственный экспериментальный стенд, позволяющий оказывать и замерять данную силу на оптоволоконный кабель без сильного искривления. Проведён подробный анализ результатов эксперимента, а также приведены выводы о том, как данная сила влияет на передачу сигнала.

N.R. GANAKIN, A.R. SALEEV, I.M. SIMONOV,  
M.A. YARYGIN, S.V. PAVLOV

*Moscow Technical University of Communication and Informatics*

## **THE EFFECT OF TRANSVERSE POINT FORCE ON FIBER OPTIC CABLE SIGNAL TRANSMISSION**

In this paper, the effect of transverse point gravity on the signal transmission of a fiber-optic cable is investigated. Our own experimental stand has been developed that allows us to exert and measure this force on a fiber-optic cable without strong curvature. A detailed analysis of the experimental results is carried out, as well as conclusions about how this force affects signal transmission.

Известно, что при искривлении оптоволоконного кабеля, как и в любом материале, создаются микро- и макроизгибы, порождающие анизотропность сердцевины, с точки зрения электромагнитических свойств, это ведёт к ухудшению передаваемого сигнала. В статьях [1 - 3] подробно исследовался вопрос такого рода изгибов и был представлен полноценный математический аппарат для оценки потерь сигнала. В работе [4] также подробно были исследованы подвесные оптоволоконные кабели и влияние на передаваемый сигнал со стороны колебаний столбов и потоков ветра. Однако, в некоторых ситуациях прокладки кабеля, на него может оказываться большое давление в малой по площади области. Такое точечное воздействие не было исследовано ранее.

Целью работы является исследование влияния поперечной силы, действующей на оптоволоконный кабель, на характеристики

передаваемого сигнала, а именно – на потери. В качестве источника излучения был взят импульсный лазер (мощностью 75 мкВт с длительностью импульса 200 нс на длине волны 1.55 мкм), а в качестве источника силы – нерастяжимая нить, сила натяжения которой (в пересчёте на массу) показывается на весах (рис. 1).

Результаты эксперимента показали, что с ростом силы воздействия на оптоволокно, вносимые потери растут по экспоненциальному закону (рис. 2). Однако, было показано, что потери, вносимые от изгибов волокна незначительны и не могут приводить к таким значениям потерь сигнала, а значит больший вклад внесло изменение самой структуры волокна, а именно проявление внутренних неоднородностей в точке воздействия.

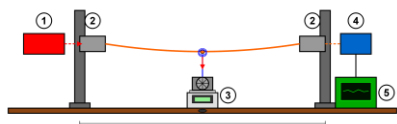


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

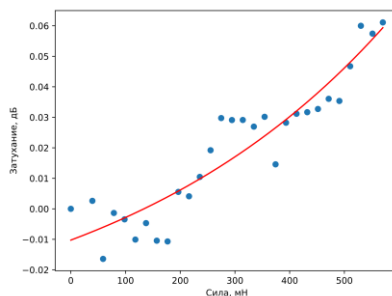


Рис. 2. Результат аппроксимации затухания

#### Список литературы

1. Zhou, C. Summary of bending loss in optical fibers // Journal of Optical Communications. 2023. V. 45. No. 2. P. 101–105.
2. Zhao S., Liu Y., Yang L., et al.] Improved evaluation model for macro-bending loss and power variation in single-mode fiber // Optics Communications 2024. V. 562.
3. Zhu P., Liu P., Wang Z., et al. Evaluating and minimizing induced microbending losses in optical fiber sensors embedded into glass-fiber composites // Journal of Lightwave Technology. 2021. V. 39. No. 22.
4. Tatsuya O., Daisuke I., Yusuke K., Nazuki H. Deployment condition visualization of aerial optical fiber cable by distributed vibration sensing based on optical frequency domain reflectometry // Journal of Lightwave Technology. 2021. V. 39. No. 21.

В.С. АНПИЛОВ<sup>1,3</sup>, Р.И. ШАЙДУЛЛИН<sup>1,2</sup>, Я.А. ТЕЗАДОВ<sup>3</sup>,  
М.А. ГОЛУБЕВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

<sup>2</sup>Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН

<sup>3</sup>ООО «ВПП Лазеруан», Фрязино

## **РАСШИРЕННАЯ GN-МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ НА ОПТИЧЕСКИЙ СИГНАЛ В КОГЕРЕНТНЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ**

Была проанализирована расширенная GN-модель влияния нелинейных эффектов на сигнал на основе экспериментальных результатов тестирования ВОЛС протяженностью 3000 км.

V.S. ANPILOV<sup>1,3</sup>, R.I. SHAIDULLIN<sup>1,2</sup>, Ya.A. TEZADOV<sup>3</sup>,  
M.A. GOLUBEV<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

<sup>2</sup>Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS

<sup>3</sup>LLC «VPG Lazerone», Fryazino

## **ENHANCED GN-MODEL OF THE IMPACT OF NONLINEAR EFFECTS ON OPTICAL SIGNALS IN COHERENT COMMUNICATION SYSTEMS**

An enhanced GN-model of the impact of nonlinear effects on the signal was analyzed based on experimental results from testing a 3000 km long fiber-optic communication line.

В связи с экспоненциальным развитием объёма передаваемой информации в телекоммуникационной среде все чаще используют многопролётные волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) протяжённостью несколько тысяч километров. В таких системах помимо рассмотрения усиленного спонтанного шума, сформированного на эрбиевых оптических усилителях, требуется учитывать оптический шум, накопленный за счёт влияния нелинейных эффектов.

Для описания влияния нелинейных эффектов на основе эффекта Керра на шумовые характеристики сигнала была предложена GN-модель, позволяющая выполнять приблизительный прогноз оптических

характеристик когерентной системы [1]. Аналитическая модель продемонстрировала высокое расхождение теоретических и экспериментальных результатов параметров ВОЛС при малом числе пролетов, однако отчётливо наблюдалась тенденция к прогнозированию уровня шумов менее 15 % на расстояниях более 1000 км (10 пролетов по 100 км).

Для повышения точности предсказания в данной работе будет рассмотрена расширенная GN-модель, которая дополнительно вводит зависимость мощности нелинейного шума (НШ) от типа модуляции [2], на основе экспериментальных результатов передачи сигнала со скоростью 100 Гбит/с и форматом модуляции QPSK по ВОЛС протяженностью 3000 км (рис. 1). Для выравнивания спектральной мощности каналов через 500 км был установлен ROADM со встроенными аттенюаторами.

Воспользовавшись формулой для отношения сигнал-шум SNR с учётом нелинейных эффектов получаем экспериментальные и теоретические зависимости от расстояния в логарифмическом масштабе для диапазона канальных мощностей (рис. 2), где отчётливо наблюдается тенденция к прогнозированию уровня шумов с погрешностью менее 10 %.

Таким образом, дополнительная поправка зависимости мощности НШ от типа модуляции помогла улучшить прогнозирование значений SNR сигнала при разных канальных мощностях на 5 %.

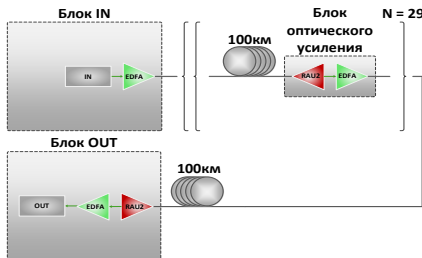


Рис. 1. Структурная схема экспериментального стенда ВОЛС протяженностью 3000 км

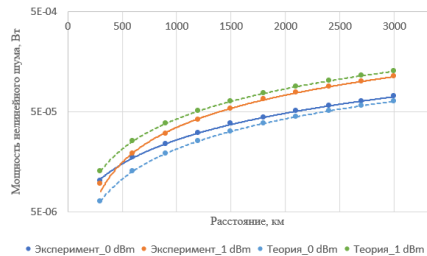


Рис. 2. Экспериментальная и теоретическая зависимости мощности нелинейного шума от расстояния

#### Список литературы

1. Poggiolini P., et al. // Journal of Lightwave Technology. 2013. V. 32 (4). P. 694-721.
2. Carena A., et al. // Optics Express. 2014. V. 22 (13). P. 16335-16362.

А.В. БАХУС, С.Ю. КАЗАНЦЕВ, А.К. НАНИДЖАНЫН,  
М.А. ЯРЫГИН

*Московский технический университет связи и информатики*

## **ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ МАГНИТНЫХ И АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА КВАНТОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КЛЮЧЕЙ В МНОГОСЕРДЦЕВИННОМ ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ**

Представлены результаты экспериментальных исследований воздействия внешних магнитных и акустических полей на поляризационные искажения, возникающие при передаче сигналов в кварцевом многосердцевинном волокне. Рассмотрены методы снижения деструктивного влияния внешних воздействий на квантовое распределение ключей через кварцевое оптическое волокно.

A.V. BAKHUS, S.Yu. KAZANTSEV, A.K. NANIDZHANYAN,  
M.A. YARYGIN

*Moscow Technical University of Communications and Informatics*

## **INFLUENCE OF EXTERNAL MAGNETIC AND ACOUSTIC FIELDS ON QUANTUM KEY DISTRIBUTION IN A MULTICORE OPTICAL FIBER**

The results of experimental studies of the effects of external magnetic and acoustic fields on polarization distortions occurring during signal transmission in quartz multi-core fiber are presented. Methods for mitigating the destructive influence of external factors on quantum key distribution through quartz optical fiber are discussed.

Известно, что телекоммуникационный кабель подвержен влиянию внешних электромагнитных полей, которые могут исказить поляризацию лазерного излучения, проходящего через оптическое волокно, что приводит к росту ошибок и снижению скорости выработки квантового ключа [1 - 3]. Компенсация искажений поляризации излучения, вызванных воздействием электромагнитных и акустических полей, является актуальной задачей для корректного определения поляризационных состояний одиночных фотонов без прямого вмешательства в процесс передачи квантового ключа [4]. Целью работы является исследование корреляций поляризационных искажений, возникающих при передаче оптических сигналов в разных сердцевинах многосердцевинного волокна (МСВ), которые вызывались искусственными магнитными и акустическими полями, воздействующими на катушку кварцевого



многосердцевинного волокна. Для достижения поставленной цели использовалась методика, которая ранее применялась в экспериментах [4].

На рис. 1 показана схема экспериментальной установки для исследования корреляций поляризационных искажений в сердцевинах МСВ под воздействием внешних полей. Установка состоит из МСВ, предоставленное компанией ПАО ПНППК, лазерного диода (Nolatech DFB – 1550 нм 14ВФ – 10 мВт), работающего на длине волны 1546,7 нм, светоделителей 50 : 50, поляризационного светоделителя, балансного фотодетектора (БФД), осциллографа (Tektronix MSO54 (5-BW-1000) с полосой пропускания 1 ГГц), оптического волокна SMF-28, источника продольного магнитного поля и источника акустических полей и вибраций, которые имитировали воздействие внешних полей (ВВП).

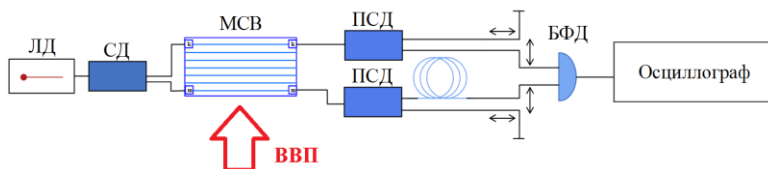


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

В экспериментах было установлено, что внешние поля, действующие на МСВ, искажают поляризационные состояния фотонов, распространяющихся в разных сердцевинах этого волокна. Однако влияние продольных полей на разные сердцевинки, оказывается сильно коррелированным, что делает возможным разработку устройства для компенсации поляризационных искажений.

#### Список литературы

1. Белова О.С., Болотов Д.В., Бушуев Э.Ю. и др. Влияние атмосферных разрядов на скорость генерации криптографического ключа в системах квантовой коммуникации // Оптический журнал. 2025. Т. 92. № 1. С. 13-20.
2. Бушуев Э.Ю. и др. Исследование влияния электрических и магнитных полей на волоконно-оптическую систему связи с квантовокриптографической аппаратурой // Электросвязь. 2025. № 5. С. 12-18.
3. Belova O.S., et al. The Influence of atmospheric electricity and lightning on the operation of communication systems with quantum key distribution // Technical Physics Letters. 2025. V. 51. No. 2. P. 43-47.
4. Kazantsev S.Y., Bahus A.V., Nanidzhanyan A.K. Yarygin M.A. Correlation of polarization distortions in multi-core fiber under external influence // 2025 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. Tyumen, 2025. P. 1-5,

Т.Р. ЗАГИРОВ, Е.Ю. ЗЛОКАЗОВ, М.И. КАЗЬМИН, Д.А. РЫМОВ,  
Р.С. СТАРИКОВ, А.В. ШИФРИНА

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **УЛУЧШЕНИЕ СИГНАЛОВ АНАЛОГОВОГО ОПТИЧЕСКОГО ТРАКТА С ПРЯМОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

В данной работе проводилась обработка сигналов аналогового оптического тракта с целью их улучшения с применением свёрточных и рекуррентных моделей нейросетей. Продемонстрировано, что предложенный подход позволяет нейронной сети устранять нелинейные гармоники сигнала, подавлять шум, а также восстанавливать форму сигнала.

T.R. ZAGIROV, E.Yu. ZLOKAZOV, M.I. KAZMIN, D.A. RYMOV,  
R.S. STARIKOV, A.V. SHIFRINA

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

## **ENHANCEMENT OF SIGNALS IN DIRECTLY MODULATED ANALOG OPTICAL LINKS USING NEURAL NETWORKS**

This work focused on processing signals from an analog-optical link with the goal of their improvement using convolutional and recurrent neural network models. Demonstrates that the proposed approach enables the neural network to eliminate nonlinear signal harmonics, suppress noise, and restore the original signal waveform.

Повышение качества сигналов аналоговых оптических трактов является актуальной задачей [1]. Перспективным методом является применение нейросетевой обработки [2 - 4].

Целью данной работы является демонстрация улучшения сигнала аналого-оптического тракта при использовании нейросетевых моделей. Работа моделей проверялась на записанном двухтоновом сигнале, вид которого указан на рис. 1а. На рис. 1б представлен вид выходного, улучшенного двухтонового сигнала свёрточной сети. Модель CNN обучалась на парах сигналов, представляющих из себя сумму четырёх сигналов, с учётом и без учёта гармоник второго и третьего порядка. На рис. 1в указан вид выходного, улучшенного рекуррентной сетью двухтонового сигнала. На рис. 2 указан вид спектров описанных сигналов. Модель рекуррентной нейронной сети, типа LSTM обучалась на наборе из

восьми сигналов, с учётом и без учёта перекрёстных гармоник второго и третьего порядка.

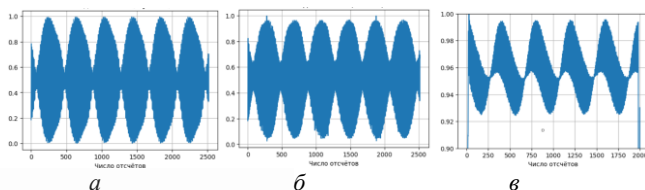


Рис. 1. Записанный в эксперименте двухтоновый сигнал (а); улучшенный сигнал со свёрточной нейронной сети (б) и улучшенный сигнал с рекуррентной нейронной сети (в)

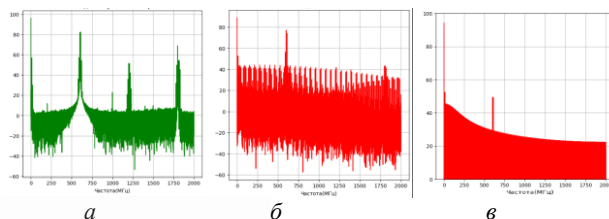


Рис. 2. Спектр записанного в эксперименте двухтонового сигнала (а); спектр выходного сигнала со свёрточной нейронной сети (б) и спектр выходного сигнала с рекуррентной нейронной сети (в)

Обе модели способны восстанавливать вид сигнала. При этом рекуррентная сеть лучше справилась с задачей устранения величин второй и третьей гармоник. Недостатками метода на данном этапе представляются генерация дополнительных эквидистантных гармоник свёрточной нейронной сетью, а также некоторое несоответствие формы сигнала, сгенерированного рекуррентной нейронной сетью.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 24-19-00898.

#### Список литературы

- 1 Урик-мл. В.Дж., МакКинни Дж.Д., Вильямс К.Дж. Основы микроволновой фотоники. Москва : Техносфера, 2016.
2. Wang Y., Chen H., Zhang L. // IEEE Photonics Technology Letters. 2022. V. 34. P. 537-540.
3. Посохов А.С. Нейросетевая обработка сигналов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 11. С. 146-152.
4. Xu S., et al. Deep-learning-powered photonic analog-to-digital conversion // Light: Science & Applications. 2019. V. 8. No. 1. P. 66.

И.В. ГАЛАКТИОНОВ<sup>1,2</sup>, А.В. ЛЕПИЛИН<sup>1</sup>, В.В. ТОПОРОВСКИЙ<sup>1</sup>,  
О.В. КОЛЕСНИКОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Московский технический университет связи и информатики*

<sup>2</sup>*Московский политехнический университет*

## **КОМПЕНСАЦИЯ АТМОСФЕРНЫХ ИСКАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ОПТИЧЕСКОЙ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ**

В работе описано использование оптической беспроводной связи (FSO) для квантовой коммуникации. Ключевое преимущество технологии – передача в свободном пространстве требует минимальной инфраструктуры и эффективнее волоконной оптики. Основной проблемой являются искажения волнового фронта из-за атмосферной турбулентности. Для создания надежной квантовой связи необходима компенсация этих искажений с помощью адаптивной оптики, чтобы достичь высоких показателей эффективности и минимизировать битовые ошибки.

I.V. GALAKTIONOV<sup>1,2</sup>, A.V. LEPILIN<sup>1</sup>, V.V. TOPOROVSKY<sup>1</sup>,  
O.V. KOLESNIKOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Moscow Technical University of Communications and Informatics*

<sup>2</sup>*Moscow Polytechnic University*

## **COMPENSATION OF ATMOSPHERIC DISTORTIONS IN OPTICAL WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS**

The article is devoted to the use of optical wireless communication (FSO) for quantum communication. The key advantage of the technology is that transmission in free space requires minimal infrastructure and is more efficient than fiber optics. The main problem is the distortion of the wavefront due to atmospheric turbulence. To create reliable quantum communication, it is necessary to compensate for these distortions using adaptive optics in order to achieve high efficiency and low error.

Оптическая беспроводная связь (FSO) – перспективная альтернатива радиосвязи, отличающаяся повышенной безопасностью и высокой скоростью передачи данных. Она находит применение в защищённой связи между участниками [1] и в обмене данными между летательными аппаратами и наземными станциями [2]. Однако постоянной проблемой в области квантовой связи является эффективное распределение квантовых состояний на большие расстояния, особенно для запутанных состояний, которые проявляют коррелированные свойства независимо от расстояния между отдельными частицами [3].

Распределение фотонных состояний может быть достигнуто либо с помощью волоконной оптики, либо передачей в свободном пространстве. Последний метод обладает явным преимуществом, поскольку требует минимальной инфраструктуры за пределами передающей и принимающей станций. Эта характеристика облегчает интеграцию оптических систем в существующие квантовые сети [4]. Кроме того, передача света в свободном пространстве, как правило, более эффективна, что делает её привлекательным вариантом для квантовой связи.

Однако существенным препятствием является искажение волнового фронта, вызванное атмосферной турбулентностью и аэрозольным рассеянием, особенно на больших расстояниях передачи [5]. Для создания надёжной квантовой линии связи необходимо, чтобы эффективность связи [6] превышала 50 %, а среднеквадратическая ошибка волнового фронта была ниже 0,5 радиан. Это требует обеспечения качества лазерного луча, близкого к дифракционному пределу.

Для компенсации искажений используются устройства с динамически изменяемой отражающей поверхностью: микроэлектромеханические системы (МЭМС), пространственные модуляторы света и пьезоэлектрические зеркала. Их применение в системах FSO активно исследуется [7]. Механизмы коррекции могут быть реализованы как на стороне передатчика, так и на стороне приёмника.

Зависимость эффективности связи и битовой ошибки от аберраций волнового фронта изучена в работе [8] и представлены на рис. 1 и 2.

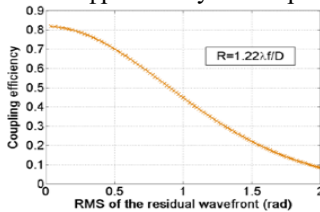


Рис. 1 Зависимость эффективности связи от аберраций волнового фронта

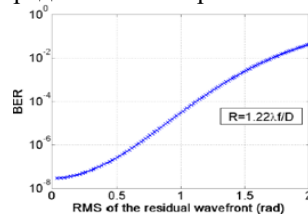


Рис. 2. Зависимость битовой ошибки от аберраций волнового фронта

#### Список литературы

1. Domb M.; Leshem // Applied System Innovation. 2020, V. 3. P. 11.
2. Trung H.D. // Applied System Innovation. 2021. V. 4. P. 65.
3. Zych M., Costa F., et al. // Class. Quantum Gravity. 2012. V. 29. P. 224010.
4. Badás M., Piron P., et al. // Opt. Express. 2025. V. 33. P. 33686.
5. Galaktionov I.V., et al. // Quantum Electron. 2015. V. 45. P. 143-144.
6. Tomlinson W.J., Wagner R.E. // Appl. Opt. 1982. V. 21. P. 2671-2688.
7. Galaktionov I.V., Sheldakova J.V., et al. // Photonics. 2023. V. 10. P. 1147.
8. Wang R., Wang Y., et al. // Opt. Commun. 2019. V. 431. P. 167-173.

З.Д. ЕВСЮХИН, М.И. КАЗЬМИН, В.А. НЕБАВСКИЙ,  
Т.Д. НЕНАШЕВ, И.С. ПОЧТАРЕВ, Р.С. СТАРИКОВ  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **ОСОБЕННОСТИ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ АНАЛОГОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ТРАКТОВ С ЦИФРОВЫМ ВЫХОДОМ, РЕАЛИЗОВАННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ФОТОДИОДОВ**

Приведены результаты экспериментов по исследованию влияния различных характеристик фотодетекторов на качество сигнала радиофотонного тракта после оцифровки.

Z.D. EVSIUKHIN, M.I. KAZMIN, V.A. NEBAVSKIY,  
T.D. NENASHEV, I.S. POCHTAREV, R.S. STARIKOV  
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*

## **FEATURES OF CHARACTERIZATION OF ANALOG OPTICAL PATHS WITH DIGITAL OUTPUT IMPLEMENTED USING VARIOUS PHOTODIODES**

This paper presents the results of experiments that were devoted to studying the influence of various parameters of photodetectors on the parameters of the signal received in the radio-photon link after its digitization.

В настоящий момент СВЧ аналоговые оптические тракты находят всё большее применение в силу их фундаментальных преимуществ, таких как возможность работы на сверхвысоких частотах, повышенная устойчивость к электромагнитным помехам, низкие потери при передаче на большие расстояния благодаря оптическим волноводам, а также потенциал для интеграции с фотонными процессорами, что позволяет создавать компактные и энергоэффективные системы радиолокации, связи и обработки сигналов [1]. Поскольку все элементы волоконной линии работают в широком диапазоне частот, то именно параметры аналого-цифрового преобразователя (АЦП) становятся определяющими в плане широкополосности тракта. В этом случае необходимо осуществлять подбор элементов для максимизации качества сигнала после оцифровки.

Целью работы является определение особенностей влияния характеристик фотодиодов на качество сигнала аналогового оптического

тракта с цифровым выходом. В данной работе проводится сравнение ключевых цифровых метрик [2 - 5] результирующего сигнала при использовании различных фотодетекторов. На рис. 1 представлена схема эксперимента. В качестве источника излучения использовали лазер с перестраиваемой частотой TWL-C-HP-M (Optilab, США) с полосой перестройки 1527 - 1567 нм, максимальной мощностью около 16 дБм и шириной спектра оптического излучения менее 10 кГц. Длина волны излучения лазера в этом эксперименте – 1550 нм, мощность – 16 дБм. Модуляция света выполнялась модулятором интенсивности Маха–Цендера (ММЦ) 1 x 2 Dual-Output Modulators (EOSPACE, США). В работе используется ММЦ с двумя комплементарными выходами, что позволяет использовать один из них в качестве обратной связи для подстройки рабочей точки с помощью осциллографа DSAZ334A (Keysight, США). Питание ММЦ обеспечивалось источником тока QJE QJ1501D (Ningbo Jiuyuan Electronic, Китай). Источником СВЧ-сигнала на ММЦ выступал генератор N5181A (Agilent, США). Сигнал с первого выхода подаётся на тестируемый фотодетектор (ФД), сигнал с которого цифруется при помощи платы АЦП с частотой дискретизации 4 ГГц.

Проведены измерения сигналов на различных частотах в диапазоне 2 ГГц для разных фотодетекторов, рассчитаны ключевые метрики для оцифрованного сигнала. Полученные результаты позволяют проводить оценку влияния параметров фотодетекторов на качество сигнала в радиофотонных трактах после оцифровки и могут быть использованы при выборе элементной базы для волоконных систем передачи данных.

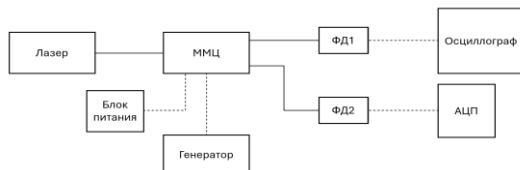


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 24-19-00898.

#### Список литературы

1. Корсон Дж.Л., Стюарт Р.Дж. // Microwave Photonic Systems, Inc. USA, 2023.
2. IEEE Std 1241-2023.
3. Riehle F. Weinheim: Wiley-VCH, 2004.
4. Иванов Г.Ю., Фомиряков Э.А., Данилов А.Ю. и др. // Тезисы ВКВО. 2025.
5. Keysight Technologies. E5052B Signal Source Analyzer: Advanced Phase Noise and Transient Measurement Techniques : Application Note. USA, 2024.

Е.Р. БУРМИСТРОВ, Н.В. ПЧЕЛКИНА

*Московский технический университет связи и информатики*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРА ЗАТУХАНИЙ С-ДИАПАЗОНА АТМОСФЕРНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ**

Представлен теоретический анализ данных о спектре затуханий сигнала С-диапазона (1530 - 1565 нм) в атмосферной оптической связи на основе научных публикаций и моделей аэрозольного рассеяния Кима и Крузе–Мунка, а также модели турбулентности Эндрюса. Рассмотрено влияние различных атмосферных факторов на затухание оптического сигнала.

E.R. BURMISTROV, N.V. PCHELKINA

*Moscow Technical University of Communications and Informatics*

## **INVESTIGATION OF THE ATTENUATION SPECTRUM C-BAND IN FREE-SPACE OPTICS**

The paper presents a theoretical analysis of the C-band (1530 - 1565 nm) signal attenuation spectrum in Free-Space Optics based on scientific publications and Kim and Kruse–Munk aerosol scattering models, as well as the Andrews turbulence model. The paper examines the influence of various atmospheric factors on the attenuation of the optical signal.

Атмосферная оптическая связь (АОС) – перспективная технология для высокоскоростной беспроводной передачи данных. Её основным ограничением является сильная зависимость от атмосферных условий, особенно тумана [1]. С-диапазон (1530 - 1565 нм) привлекателен для АОС благодаря развитой компонентной базе. Однако спектральные характеристики затухания в этом диапазоне изучены недостаточно системно. Цель работы – теоретический анализ спектра затуханий в С-диапазоне на основе существующих литературных данных для выявления оптимальных рабочих длин волн.

Методология основана на сравнительном анализе научных публикаций по моделированию и измерениям в системах FSO. Исследовались основные составляющие затухания: молекулярное поглощение, аэрозольное рассеяние и турбулентность. Данные HITRAN [2] и работы [3] показывают, что молекулярное поглощение в С-диапазоне незначительно. Основной вклад вносит аэрозольное рассеяние. Модель Крустера–Мунка [4] описывает зависимость затухания от длины волны



как  $\lambda^{-q}$ , где  $q$  – показатель спектральной зависимости,  $q \approx 0$  – очень крупные частицы (сильный дождь),  $q = 0.5 - 1.0$  – средние частицы (слабый дождь, дымка),  $q \approx 1.6$  – мелкие частицы (густой туман),  $q = 4$  – очень мелкие частицы (молекулярное рассеяние). Уточнённая модель Кима [5] подтверждает усиление затухания на коротких волнах. Вклад турбулентности [6] в С-диапазоне слабо зависит от длины волны.

Анализ данных [5, 7, 8] показал, что в ясную погоду затухание составляет порядка 0.1 - 0.3 дБ/км [7] без выраженной спектральной зависимости. В тумане (при видимости 0.5 км) затухание на 1550 нм достигает 12 - 17 дБ/км, а на длине волны 1530 нм – 14 - 20 дБ/км [5, 8], демонстрируя наличие спектральной зависимости. В дождь затухание меньше и слабее зависит от длины волны. Ключевой результат – выявление оптимального поддиапазона 1550 - 1560 нм, где затухание на 5 - 15 % ниже, чем на границах С-диапазона. Это объясняется теорией рассеяния Ми, при которых длинные волны меньше взаимодействуют с частицами тумана.

Проведённый теоретический анализ показал выраженную спектральную зависимость затухания в С-диапазоне систем FSO в условиях тумана и позволил определить оптимальный поддиапазон 1550 - 1560 нм. Полученные выводы требуют экспериментальной проверки. Перспективы работы включают натурные измерения для верификации результатов и разработку практических рекомендаций по выбору рабочих длин волн в FSO-системах.

#### *Список литературы*

1. Клепиков Д.А., Носов И.Ю., Пчелкина Н.В. // Новые технологии. Наука, техника, педагогика. 2024. С. 460-465.
2. Gordon I.E., et al. // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2017. V. 203. P. 3-69.
3. Gebhart M., et al. // Proc. SPIE. 2006. V. 6303.
4. Kruse P.W., et al. Elements of Infrared Technology: Generation, Transmission, and Detection. New York: Wiley, 1962.
5. Kim I.I., McArthur B., Korevaar E.J. // Proc. SPIE. 2001. V. 4214. P. 26-37.
6. Andrews L.C., Phillips R.L. Laser Beam Propagation through Random Media. 2nd ed. SPIE Press, 2005.
7. Naboulsi A. C., et al. // Optical Engineering. 2004. V. 43(2). P. 319-329.
8. / Ding H., et al. // Optics Express. 2019. V. 27 (18). P. 26379-26391.

М.Т. СЕМКИВ, Е.Ю. ЗЛОКАЗОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА СТАБИЛИЗАЦИИ СИГНАЛА  
ВЫБОРКИ ДЛЯ СИСТЕМ ПАССИВНОГО УМНОЖЕНИЯ  
ЧАСТОТЫ СЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСОВ ФОТОННЫХ  
АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

Предложен адаптивный алгоритм коррекции временных задержек, направленный на стабилизацию тактовой последовательности в фотонных аналого-цифровых преобразователях (ФАЦП) с пассивным умножением частоты. Результаты математического моделирования подтвердили высокую эффективность подхода: точность компенсации неустойчивости интервалов составила  $230 \pm 80$  фс для первого канала задержки и  $310 \pm 100$  фс для второго. Использование алгоритма позволит повысить стабильность последовательности и снизить величину джиттера ФАЦП.

M.T. SEMKIV, E.Yu. ZLOKAZOV

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

**DEVELOPMENT OF A SAMPLING SIGNAL STABILIZATION  
METHOD FOR SYSTEMS OF PASSIVE PULSE REPETITION  
FREQUENCY MULTIPLICATION OF PHOTONIC  
ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTERS**

An adaptive algorithm for correcting time delays is proposed, aimed at stabilizing the clock sequence in photonic analog-to-digital converters with passive frequency multiplication. The results of mathematical modeling confirmed the high efficiency of the approach: the accuracy of interval instability compensation was  $230 \pm 80$  fs for the first delay channel and  $310 \pm 100$  fs for the second. Using the algorithm will increase the stability of the sequence and reduce the magnitude of the jitter of the PADC.

Развитие высокоскоростных фотонных аналого-цифровых преобразователей (ФАЦП) требует формирования стабильных тактовых последовательностей со сверхнизким джиттером [1]. Перспективным методом увеличения частоты дискретизации является пассивное умножение частоты следования импульсов, генерируемых лазером в режиме синхронизации мод, с использованием нескольких оптических каналов с различными задержками [2]. Однако, практическая реализация таких систем ограничена временным дрейфом импульсов, обусловленным термомеханической неустойчивостью оптоволоконных линий, что

приводит к нарушению равномерности тактовой сетки и снижению эффективного числа бит.

Разработана модель системы умножения импульсов (рис. 1) и алгоритм компенсации временных рассогласований на основе градиентного спуска. Алгоритм целенаправленно минимизирует амплитуды всех значимых гармоник в спектре выходного сигнала, за исключением гармоник, кратных трём, что является критерием эквидистантности генерируемых импульсов. Важной особенностью алгоритма является возрастающая точность компенсации при работе со старшими гармониками (рис. 2), что позволяет строить многоступенчатую процедуру оптимизации. На основе данного принципа реализован каскадный алгоритм оптимизации, который начинает работу с крупным шагом на высших гармониках и последовательно переходит к более низким по мере достижения заданной точности. Для обеспечения работы в реальном времени введён параметр оптимизации, учитывающий как точность компенсации, так и скорость сходимости:

$$P_{opt} = n_{steps} \cdot \sqrt{(A_1 - A_{1 ideal})^2 + (A_2 - A_{2 ideal})^2}.$$

Проведённое моделирование с учётом белого шума и рассогласований мощности в каналах позволило определить оптимальный шаг алгоритма для каждой гармоники, в результате получена точность компенсации  $230 \pm 80$  фс для первого канала задержки и  $310 \pm 100$  фс для второго.

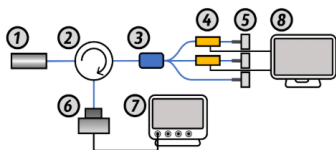


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:  
1 – ЛСМ, 2 – циркулятор, 3 – оптоволоконный разветвитель, 4 – блок временной задержки, 5 – зеркало Фарадея, 6 – фотодетектор, 7 – осциллограф, 8 – компьютер

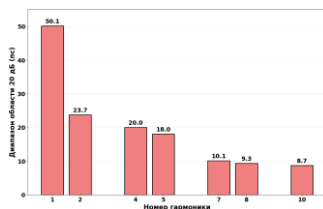


Рис. 2. Диаграмма изменения двадцатидецибельного диапазона гармоник различного порядка

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 24-19-00898.

#### Список литературы

1. Khilo A., Spector S.J., et al. // Optics Express. 2012. V. 20. No. 4. P. 4454-4469.
2. Kosolapov A.F., Bulusheva L.A., et al. // Scientific Reports. 2024. V. 14. P. 10552.

Н.В. ПЧЕЛКИНА, С.А. ЧИЖ

*Московский технический университет связи и информатики*

## **ВЛИЯНИЕ ЖИДКИХ ОСАДКОВ НА ОСЛАБЛЕНИЕ СИГНАЛА В АТМОСФЕРНОМ ОПТИЧЕСКОМ КАНАЛЕ**

Рассмотрены методики оценки ослабления оптического сигнала в атмосферном канале при наличии жидких осадков. Проведены расчёты коэффициента пропускания атмосферы в зависимости от интенсивности дождя, размера капель и протяженности атмосферного канала.

N.V. PCHELKINA, S.A. CHIZH

*Moscow Technical University of Communications and Informatics*

## **THE EFFECT OF LIQUID PRECIPITATION ON SIGNAL ATTENUATION IN THE ATMOSPHERIC OPTICAL CHANNEL**

Methods for estimating optical signal attenuation in an atmospheric channel in the presence of liquid precipitation are considered. Calculations of the atmospheric transmission coefficient have been carried out depending on the intensity of rain, the size of drops and the length of the atmospheric channel.

Технология оптической беспроводной передачи (атмосферная оптическая связь – АОС) с каждым годом становится все более востребованной, но она имеет и свои недостатки, основной из которых сильная зависимость от погодных условий и прежде всего от наличия или отсутствия атмосферных осадков. Различные их типы с разной степенью способствуют повышению затухания оптического сигнала в атмосферном канале [1].

Цель работы – проанализировать зависимость ослабления оптического сигнала в атмосферном канале АОС от жидких атмосферных осадков (дождь).

Основными характеристиками осадков являются концентрация частиц (капель) и их распределение по размерам. В случае, когда не известны эти параметры, а задается только дальность видимости, то для расчёта ослабления в тумане можно использовать модель Крузе [2], тогда получаем соответствующие зависимости коэффициента затухания для длин волн оптического излучения (950, 1310 и 1550 нм), изображённые на рис. 1. Очевидна слабо выраженная зависимость коэффициента затухания от длины волны излучения.

Если известны радиус капель и их концентрация, то для определения коэффициента ослабления сигнала возможно применение теории рассеяния Ми [3]. При моделировании задаются средние значения концентрации капель в зависимости от их размера и необходимая протяженность атмосферного канала.

Применение теории рассеяния Ми с моделью Лоуса–Парсонса для оценки влияния дождя на прозрачность атмосферы позволяет учесть распределение капель дождя по размерам [4]. На рис. 2 приведены зависимости коэффициента прозрачности атмосферы от интенсивности осадков, размера капель и дальности передачи. Получается, что при интенсивности  $I = 25$  мм/ч (сильный дождь) и диаметре капель  $d = 2$  мм коэффициент пропускания атмосферы выше, чем при меньших значениях  $I$  и  $d$  (10 мм/ч (умеренный дождь) и 1 мм, соответственно). Для рассмотренных вариантов сочетания интенсивности дождя и размера капель коэффициент пропускания будет более 80 % при протяженности атмосферного канала не более 600 м.

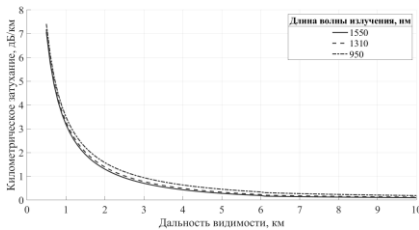


Рис. 1. Зависимости коэффициента затухания от длины волны излучения и дальности видимости

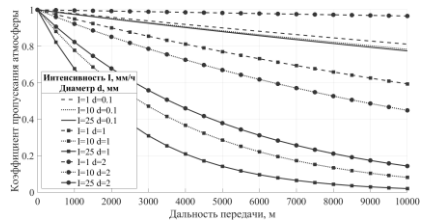


Рис. 2. Зависимость коэффициента пропускания атмосферы от интенсивности дождя, размера капель и дальности передачи

#### Список литературы

1. Пронин А.А., Чиж С.А., Пчелкина Н.В. // Наука, техника, педагогика высшей школы. Новые технологии. 2023. С. 569-575.
2. Kruse P.W., McLaughlin L.D., McQuistan R.B. Elements of Infrared Technology: Generation, transmission, and detection. John Wiley & Sons, New York, 1962.
3. Клепиков Д.А., Носов И.Ю., Пчелкина Н.В. // Новые технологии. Наука, техника, педагогика. 2024. С. 460-465.
4. Laws J.O., Parsons D.A. The relation of raindrop-size to intensity // Trans. American Geophysical Union. 1943. V. 24 (2). P. 452-460.

И.В. ГАЛАКТИОНОВ<sup>1,2</sup>, М.А. МЕСЯЦЕВ<sup>1</sup>,  
В.В. ТОПОРОВСКИЙ<sup>1</sup>, О.В. КОЛЕСНИКОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский технический университет связи и информатики

<sup>2</sup>Московский политехнический университет

## **АЛГОРИТМЫ КОРРЕКЦИИ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКАНИЯ В АТМОСФЕРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ**

В данном исследовании представлены результаты фокусировки лазерного пучка диаметром 45 мм через отверстия диаметром 20 и 10 мкм с использованием двух алгоритмов: алгоритма восхождения на холм и стохастического алгоритма. Основная идея заключается в измерении интегрального сигнала на фотодиоде и его увеличении путём коррекции aberrаций волнового фронта, что позволяет сформировать пучок таким образом, чтобы минимизировать потери при прохождении через отверстие. Сигнал с фотодиода использовался в качестве целевой функции для алгоритма управления.

I.V. GALAKTIONOV<sup>1,2</sup>, M.A. MESYATSEV<sup>1</sup>, V.V. TOPOROVSKY<sup>1</sup>,  
O.V. KOLESNIKOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Moscow Technical University of Communications and Informatics

<sup>2</sup>Moscow Polytechnic University

## **ADAPTIVE ALGORITHMS FOR DISTORTION CORRECTION IN ATMOSPHERIC FREE-SPACE OPTICAL COMMUNICATION LINKS**

In this study, we present the results of focusing a laser beam with a diameter of 45 mm through apertures of 20 and 10  $\mu\text{m}$  using two algorithms: the hill-climbing algorithm and a stochastic optimization algorithm. The core idea is to measure the integral photodiode signal and increase it by correcting the wavefront aberrations, allowing the beam to be shaped in such a way that minimizes losses when passing through the aperture. The photodiode signal was used as the objective (merit) function for the control algorithm.

Одной из ключевых задач в области квантовых коммуникаций является передача квантовых состояний частиц на значительные расстояния, особенно в случае запутанных состояний, которые представляют собой состояния, разделяющие коррелированные свойства независимо от расстояния между частицами. Только фотонные кубиты

обладают достаточной степенью изоляции от окружающей среды, что позволяет эффективно передавать их состояния на большие расстояния [1]. Распространение фотонных состояний может осуществляться как по оптоволокну, так и в свободном пространстве. Последний метод имеет преимущество, заключающееся в отсутствии необходимости в дополнительной инфраструктуре между передающими и принимающими станциями (включая портативные устройства [2, 3]), что упрощает интеграцию в существующие квантовые сети [4, 5]. Кроме того, передача света в свободном пространстве обычно более эффективна по сравнению с распространением света по волокну [6, 7].

В данном исследовании представлены результаты фокусировки лазерного пучка диаметром 45 мм через отверстия диаметром 20 и 10 мкм с использованием двух алгоритмов: алгоритма восхождения на холм и стохастического алгоритма. Основная идея заключается в измерении интегрального сигнала на фотодиоде и его увеличении путём коррекции aberrаций волнового фронта, что позволяет сформировать пучок таким образом, чтобы минимизировать потери при прохождении через отверстие. Сигнал с фотодиода использовался в качестве целевой функции для алгоритма управления.

Для замыкания контура управления между деформируемым зеркалом и фотодиодом были применены два алгоритма. Первый — алгоритм восхождения на холм. Целью алгоритма зондирования апертуры или алгоритма «восхождения на холм» является максимизация плотности энергии в фокусном пятне дальнего поля, то есть уменьшение диаметра фокусного пятна до дифракционного предела с одновременным увеличением его пиковой интенсивности.

#### *Список литературы*

1. Barros R. Experimental setup for investigation of laser beam propagation along horizontal urban path. SPIE Remote Sensing, 2014, Vol. 9242, 92421L.
2. Bertocchi G., et al. Single-photon Sagnac interferometer. Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, 2006, 39(5), p. 1011.
3. Galaktionov I., et al. Bimorph vs stacked actuator deformable mirror for laser beam focusing through a moderately scattering medium. Proc. SPIE, 2021, Vol. 11672, 1167214.
4. Galaktionov I., et al. Laser beam focusing through the scattering medium – low order aberration correction approach. Proc. SPIE, 2018, Vol. 10772.
5. Hong C.K., et al. Measurement of subpicosecond time intervals between two photons by interference. Physical Review Letters, 1987, 59(18), p. 2044.
6. Kim Y., et al. Quantum teleportation of a polarization state with a complete Bell state measurement. Physical Review Letters, 2001, 86(7), p. 1370.
7. Moll F. Free-space laser system for secure air-to-ground quantum communications. SPIE Newsroom, 2013.

Д.В. ВОЛЖАНКИН, Н.А. ШВЕЦ, С.И. ЗИМИН  
*Московский технический университет связи и информатики*

**РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРНО-ОПТИЧЕСКОЙ  
ЛИНИИ СВЯЗИ НА ПРИМЕРЕ ГОРНОЙ МЕСТНОСТИ  
МЕЖДУ СЁЛАМИ УСУХЧАЙ И КУРУШ  
В ДОКУЗПАРИНСКОМ РАЙОНЕ**

Приведены расчёты параметров атмосферно-оптической линии связи на маршруте длиной 17 км в условиях горной местности. Выполнены оценки затухания сигнала при различных погодных условиях, определены допустимые пределы работы системы в зависимости от прозрачности атмосферы. Рассчитан запас по мощности, подтверждающий возможность стабильной передачи данных без промежуточных ретрансляторов. Установлены условия, при которых линия сохраняет работоспособность в течение большей части времени года.

D.V. VOLZHANKIN, N.A. SVETS, S.I. ZIMIN  
*Moscow Technical University of Communications and Informatics*

**CALCULATION OF PARAMETERS  
OF AN ATMOSPHERIC-OPTICAL COMMUNICATION LINE  
USING THE EXAMPLE OF THE MOUNTAINOUS AREA  
BETWEEN THE VILLAGES OF USUKHCHAY AND KURUSH  
IN THE DOKUZPARINSKY DISTRICT**

Presents the calculations of the atmospheric-optical communication link parameters for a 17 km route in mountainous terrain. Were evaluated the signal attenuation under various weather conditions and determined the allowable operating limits of the system depending on atmospheric transparency. Was calculated the power margin confirming the possibility of stable data transmission without intermediate repeaters. Were established the conditions under which the link remains operational for most of the year.

Атмосферно-оптические линии связи (АОЛС) являются перспективным средством организации высокоскоростной связи в труднодоступных горных районах, где затруднено строительство кабельной инфраструктуры и невозможна установка радиорелейных станций.

Целью работы является оценка возможности использования АОЛС между сёлами Усухчай и Куруш (Республика Дагестан) протяжённостью



17 км с учётом затухания сигнала, климатических условий и характеристик оборудования.

В условиях ясной погоды типичное затухание сигнала в атмосфере составляет около 0,2 дБ/км. Для всей трассы потери составляют  $A = 0,2 \times 17 = 3,4$  дБ, что существенно ниже энергетического бюджета большинства систем, достигающего 20 - 25 дБ. Это позволяет обеспечить устойчивую связь без ретрансляторов при наличии прямой видимости.

В плохую погоду, например, при лёгком тумане с затуханием  $\gamma = 20$  дБ/км, ослабление достигает  $A = 20 \times 17 = 340$  дБ [1], что делает связь невозможной. При дождливой погоде (3 дБ/км) потери составляют  $A = 3 \times 17 = 51$  дБ, что близко к пределу энергетического бюджета. Однако в регионе подобные условия бывают редко. В снегопад потери варьируются в пределах 25 - 34 дБ, что допустимо при соответствующем запасе по мощности.

Мощность передатчика +10 дБм и чувствительность приёмника -40 дБм [2] обеспечивают энергетический запас 50 дБ. Это позволяет работать при умеренных погодных помехах. Дополнительно, при расходимости луча 1 мрад, на дистанции 17 км диаметр светового пятна на приёмнике составит

$$D = 2 \times L \times \tan(\theta/2) \approx 2 \times 17 \times 0.0005 = 0.017 \text{ км} = 17 \text{ м} [3].$$

Это означает, что фотоприёмная система должна иметь апертуру, достаточную для уверенного захвата рассеянного пучка, либо использовать систему автотрекинга, которая компенсирует колебания и смещения. Использование АОЛС без промежуточных узлов возможно при грамотном выборе оборудования и соблюдении условий видимости.

#### *Список литературы*

1. Валериева В.В. Проектирование атмосферно-оптической линии связи между объектами А–Б–В. Расчёт ветровой нагрузки на АМУ // Хабр, 2023.
2. Micromax Systems. Технология АОЛС (FSO) – решение проблемы последней мили. 13 августа 2014 г.
3. Рекомендация МСЭ-R P.1817-0. Данные о распространении радиоволн, требуемые для разработки наземных оптических линий связи в свободном пространстве. Женева: ITU, 2007.
4. CableFree (Wireless Excellence). FSO: A Primer – Free Space Optics technology overview. 2019.
5. Швец Н.А., Зимин С.И. Использование АОЛС для осуществления передачи данных в чрезвычайных ситуациях на примере горной местности города Тырныауз // Статья в сборнике трудов конференции. 2025. С. 150-154.
6. Бородина П.С., Зайцев Д.В., Зимин С.И. Применение технологии атмосферно-оптической линии связи (АОЛС) при построении телекоммуникации сетей в России. // Статья в сборнике трудов конференции. 2025. С. 150-154.

Д.С. ХЛОПЦЕВА, Н.А. ШВЕЦ, С.И. ЗИМИН  
*Московский технический университет связи и информатики*

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ  
АТМОСФЕРНО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ  
НА ПРИМЕРЕ ХИМИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ  
АО «СИБУР-НЕФТЕХИМ»**

Приведены результаты экспериментов по внедрению атмосферно-оптической линии связи на предприятии. Выполнены расчёты потерь сигнала на участках, мощности на приёмнике и запаса по чувствительности. Определено время автономной работы модулей и задержка сигнала, достаточная для работы в режиме реального времени.

D.S. KHLOPTSEVA, N.A. SVETS, S.I. ZIMIN  
*Moscow Technical University of Communications and Informatics*

**DESIGN AND CALCULATION OF PARAMETERS  
OF AN ATMOSPHERIC-OPTICAL COMMUNICATION LINE  
USING THE EXAMPLE OF THE CHEMICAL ENTERPRISE  
JSC «SIBUR-NEFTEKHIM»**

Presents the results of experiments on the implementation of an atmospheric-optical communication line at an industrial facility. Were performed calculations of signal losses over given segment, received power, and sensitivity margin. Were determined the autonomous operating time of the modules and the signal delay sufficient for real-time operation.

Атмосферно-оптические линии связи (АОЛС) представляют собой эффективное решение для организации защищённого канала передачи данных на промышленных объектах, где затруднена прокладка кабеля или присутствуют высокие электромагнитные помехи [1].

Целью работы является разработка схемы АОЛС на предприятии АО «Сибур-Нефтехим» (г. Дзержинск, Нижегородская область) с расчётом потерь сигнала, задержек и автономности. На рис. 1 показана схема экспериментальной установки. На основе представленной схемы были определены протяжённости оптических каналов: ЦОД – установка ПОЭИГ (300 м), установка ПОЭИГ – акриловый комплекс (350 м), акриловый комплекс – главная диспетчерская (400 м), главная диспетчерская – насосные станции (500 м), насосные станции – ЦОД (600 м).

Для оценки затухания оптического сигнала в атмосфере использовалась формула  $L = \alpha \times d$ , где  $\alpha$  – атмосферные потери (приняты равными 10 дБ/км),  $d$  – расстояние в километрах [2]. Например, для линии длиной 300 м получаем:  $L = 10 \times 0.3 = 3$  дБ; для 600 м:  $L = 10 \times 0.6 = 6$  дБ. При передатчике мощностью 10 дБм и чувствительности приёмника – 25 дБм, мощность на приёмной стороне составила от 7 до 4 дБм, что обеспечивает запас по чувствительности от 32 до 29 дБ [3].

Питание одного АОЛС-модуля осуществляется от аккумулятора ёмкостью 18 А·ч и напряжением 12 В, при среднем потреблении 15 Вт. Время автономной работы  $t = (C \times U) / P = (18 \times 12) / 15 = 14.4$  ч.

Дополнительно были выполнены расчёты временных задержек распространения сигнала и экономии на отказе от кабельной прокладки. Задержка рассчитывалась по формуле  $t = d/c$ , где  $d$  – расстояние,  $c \approx 2.998 \times 10^8$  м/с. Для участка 300 м:  $t = 300 / (2.998 \times 10^8) \approx 1.00$  мкс (1000 нс), а для 600 м:  $t = 600 / (2.998 \times 10^8) \approx 2.00$  мкс (2000 нс). Эти значения подтверждают пригодность АОЛС для работы в системах реального времени.



Рис. 1. Схема распределения атмосферно-оптических каналов на территории предприятия

#### Список литературы

1. Бородина П.С., Зайцев Д.В., Зимин С.И. Применение технологии атмосферно-оптической линии связи (АОЛС) при построении телекоммуникации сетей в России. // Статья в сборнике трудов конференции. 2025. С. 150-154.
2. Швец Н.А., Зимин С.И. Использование АОЛС для осуществления передачи данных в чрезвычайных ситуациях на примере горной местности города Тырнауэ // Статья в сборнике трудов конференции. 2025. С. 150-154.
3. Колосов С.В., Емельянов С.М. Оптические линии связи: проектирование, эксплуатация, примеры решений. СПб: Питер, 2021.

Е.К. ПАВЛОВА, М.А. ОКАТАЯ, С.И. ЗИМИН

*Московский технический университет связи и информатики «МТУСИ»*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АТМОСФЕРНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ**

Работа посвящена использованию атмосферной оптической линии связи (АОЛС) в условиях Арктической зоне. Основное внимание уделяется обеспечению надёжной коммуникации и оперативному обмену информацией Арктической зоне для служб, корабле, в океанической среде с интеграцией с космическими станциями. Особое внимание уделено преимуществам и особенностям данной технологии, включая высокую пропускную способность, безопасность и устойчивость к радиочастотным помехам. АОЛС рассматривается как эффективное решение для обеспечения стабильной и надёжной связи между морскими платформами, судами и береговыми станциями, а также для интеграции с подводными и спутниковыми сетями связи. В условиях растущей потребности в качественных средствах связи на военно-морском флоте, обусловленной усложнением задач и увеличением объёма передаваемых данных, АОЛС представляет собой перспективное решение. Рассматривается потенциал для интеграции АОЛС в космические станции, чтобы обеспечить большой охват и надёжность сети. Статья указывает на важные аспекты, зачем нужно заниматься исследованием и разработку АОЛС. Благодаря продвижению АОЛС нам откроется много новых возможностей.

E.K. PAVLOVA, M.A. OKATAYA, S.I. ZIMIN

*Moscow Technical University of Communications and Informatics*

## **USE OF ATMOSPHERIC OPTICAL COMMUNICATION LINES IN THE ARCTIC ZONE**

This article examines the use of atmospheric optical communication lines (AOCLs) in the Arctic zone. The focus is on ensuring reliable communications and rapid information exchange in the Arctic zone for services, ships, and ocean environments, with integration with space stations. Particular attention is given to the advantages and features of this technology, including high throughput, security, and resistance to radio frequency interference. AOCLs are considered an effective solution for ensuring stable and reliable communications between offshore platforms, vessels, and shore stations, as well as for integration with underwater and satellite communication networks. Given the growing need for high-quality communications in the navy, driven by increasingly complex missions and increasing data volumes, FOSS represents a promising solution. The potential for integrating FOSS into space stations to ensure greater network coverage and reliability is explored. The article highlights key aspects of the need for

FOSS research and development. Advancing FOSS will open up many new opportunities.

В последние несколько лет развитие беспроводных технологий требует создание надежных и быстрых технологий, которые не будут привязаны к одним климатическим и географическим условиям. В данный момент очень хорошо развивают технологии передачи данных через атмосферные оптические линии связи. АОЛС находит применение не только в научных целях, а также очень часто используют в военных целях. В АОЛС очень много преимуществ, например – не требуют установки, нет привязки к климатическим и географическим условиям, а так надежность и быстрота.

В России АОЛС имеет особую значимость в контексте оснащения кораблей, в частности Черноморского флота, где надежная и быстрая передача данных в условиях дефицита стационарной инфраструктуры является одной из приоритетных задач. Способность обеспечивать оперативное взаимодействие между подразделениями в реальном времени выводит АОЛС в ряд критически важных элементов систем безопасности.

Эта работа посвящена анализу теоретических и практических аспектов применения АОЛС в арктической среде с помощью космической станцией. Благодаря этой технологии будет налажено эффективное взаимодействие между суднами и морскими объектами. При интеграции этой технологии станет доступной передача информации на надежном уровне снижая задержку.

#### *Список литературы*

1. Шарова Н.А., Гусев А.В. Оптическая связь по свободному пространству: Теория и практика. М.: Наука. 2011.
2. Белов А.В., Петров В.И. Модели и методы для анализа оптических систем связи в атмосфере // Техническая физика. 2012. Т. 82 (4). С. 415-423.
3. Морозов С.В., Щербаков И.Ю. Свободно-оптические линии связи: Проблемы и перспективы// Вестник Московского государственного технического университета связи и информатики. 2015. Т. 18 (3). С. 34-39.
4. Горелов А.Ю. Интеграция оптических и радиосистем связи для повышения надёжности в условиях турбулентности // Системы управления и информатика. 2017. Т. 22 (2). С. 102-108.
5. Зимин С.И., Степанова Л.А. Атмосферная оптическая связь: Проблемы и перспективы для России // Инновационные технологии. 2018., Т. 26 (8). С. 89-96.
6. Казанцев С.Ю., Миронов Ю.Б., Сапожников М.В. Учебно-методическое пособие «Расчет доступности канала атмосферной оптической связи». 2024.

Е.Ю. ЗЛОКАЗОВ, Т.Д. НЕНАШЕВ, Р.С. СТАРИКОВ  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ СХЕМ ГЕНЕРАЦИИ Comb-СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ МИКРОВОЛНОВОЙ ФОТОНИКИ**

Приведены результаты численного моделирования и сравнения эффективности трёх электрооптических схем генерации comb-сигналов. В работе представлена модель модулятора Маха–Цендера и реализован алгоритм оптимизации, позволяющий достичь равномерного распределения мощности генерируемых гармоник.

E.Yu. ZLOKAZOV, T.D. NENASHEV, R.S. STARIKOV  
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*

## **NUMERICAL SIMULATION OF ELECTRO-OPTICAL CIRCUITS FOR GENERATING COMB SIGNALS IN MICROWAVE PHOTONICS SYSTEMS**

The results of numerical modeling and comparison of the efficiency of three electro-optical schemes for generating comb signals are presented. The paper presents a model of the Mach–Zehnder modulator and implements an optimization algorithm to achieve uniform power distribution of the generated harmonics.

Генерация оптических частотных гребёнок (OFC) с равной мощностью гармоник является одной из ключевых задач для микроволновой фотоники и систем связи. Comb-сигналы могут использоваться в фотонных аналого-цифровых преобразователях для оптической дискретизации [1 - 3]. Однако в реальных условиях проблематично получить требуемый сигнал из-за отсутствия соответствующих компонентов, таких как множители частоты, и устройств, таких как высокочастотные генераторы. Существующие схемы часто требуют точного контроля нескольких параметров. Причинами необходимости тонкой настройки являются нелинейности передаточных характеристик модулятора, фотодиодов, несовпадение фаз модулирующих сигналов и чувствительность к внешним воздействиям. Описание смоделированных схем можно найти в работах [4 - 6].

Целью данной работы является исследование и сравнительный анализ методов генерации OFC на основе электрооптических модуляторов,

создание алгоритма автоматического поиска оптимальных параметров напряжений смещения рабочей точки и мощностей СВЧ-сигналов для достижения равной мощности гармоник.

Моделирование показало, что данные схемы являются эквивалентными, но при использовании двухпараллельного модулятора Маха–Цендера количество генерируемых эквидистантных частот оказывается меньшим в сравнении с двумя другими схемами. В то же время для использования двух последовательных модуляторов Маха–Цендера необходимо наличие двух разночастотных синфазных СВЧ-сигналов. При использовании схемы с фазовым модулятором требуется большой индекс фазовой модуляции, величиной в два-три полуволнового напряжения, что бывает невозможно достичь из-за ограничений по входной мощности. Ключевым результатом является разработанный алгоритм, который подбирает оптимальные параметры модуляции – мощности СВЧ-сигналов и напряжения смещения на каждом модуляторе – для смещения рабочей точки и достижения максимально равномерного распределения мощности по гармоникам. Результаты моделирования одной из схем генерации представлены на рис. 1 и 2.

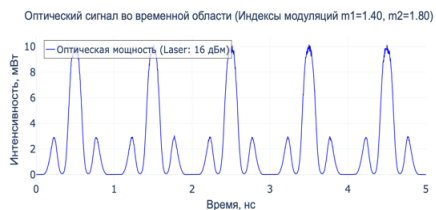


Рис. 1. Сигнал во временной области

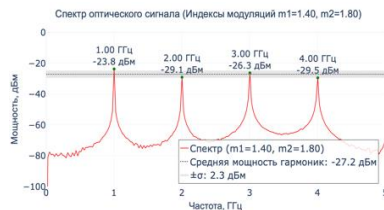


Рис. 2. Спектр полученного сигнала

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 24-19-00898.

#### Список литературы

1. Valley G. Photonic analog-to-digital converters // Opt. Expr. 2007. V. 15. P. 1955-1982.
2. Стариков Р.С. Фотонные АЦП // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 2.
3. Dadashev M.S., et al. Photonic analog-to-digital converter // Journal of Communications Technology and Electronics. 2023. V. 68. No. 2. P. 185-191.
4. Esman D.J., et al. Highly linear broadband photonic-assisted Q-Band ADC // Journal of Lightwave Technology. 2015. V. 33. No. 11. P. 2256-2262.
5. Soto M.A., et al. Generation of nyquist sinc pulses using intensity modulators // CLEO: 2013. San Jose, USA, 2013. P. 1-2
6. Shang L., et al. A flexible and ultra-flat optical frequency comb generator using a parallel Mach–Zehnder modulator with a single DC bias // Optics Communications. 2015. V. 356. P. 70-73.

И.В. ГАЛАКТИОНОВ<sup>1,2</sup>, А.В. ЛЯШЕНКО<sup>1</sup>, В.В. ТОПОРОВСКИЙ<sup>1</sup>,  
О.В. КОЛЕСНИКОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский технический университет связи и информатики

<sup>2</sup>Московский политехнический университет

## **МЕТОДЫ РУЧНОЙ ПЛОСКОЙ ПОЛИРОВКИ МНОГОМОДОВЫХ ФЕРУЛ И СПОСОБЫ УСТРАНЕНИЯ СМЕЩЕНИЯ АПЕКСА В ОПТИЧЕСКИХ РАЗЪЁМАХ**

В данном исследовании рассматриваются различные методы первичной и вторичной полировки ферулы. На этапе первичной полировки основное внимание уделяется определению оптимальных алгоритмов и технологий для достижения высококачественного состояния поверхности. Этап вторичной полировки включает методы ручной обработки с контролируемым вектором воздействия, направленные на уменьшение смещения апекса и придание сферической геометрии.

I.V. GALAKTIONOV<sup>1,2</sup>, A.V. LYASHENKO<sup>1</sup>, V.V. TOPOROVSKY<sup>1</sup>,  
O.V. KOLESNIKOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Moscow Technical University of Communications and Informatics

<sup>2</sup>Moscow Polytechnic University

## **METHODS FOR MANUAL FLAT POLISHING OF MULTIMODE FERRULES AND MITIGATION OF APEX OFFSET IN OPTICAL CONNECTORS**

This study investigates various techniques for primary and secondary polishing of the ferrule. The primary polishing phase focuses on identifying optimal algorithms and technologies to achieve damage-free and high-quality surface finish. The secondary polishing phase involves manual polishing techniques with a controlled action vector, aimed at reducing apex displacement and achieving a spherical geometry.

Исследование проводилось на многомодовых оптических ферулах с использованием стандартного оборудования для ручной полировки [1 - 3]. Процесс включал последовательное использование абразивных листов с градацией зернистости вплоть до алмазной (0,2 мкм). Для сравнения результатов параллельно проводилась автоматизированная полировка идентичных ферул на полировальной установке, обеспечивающей высокое качество полировки для последующего сравнения на интерферометре.

В рамках исследования ручной полировки была проведена серия экспериментов с различными траекториями движения ферулы



относительно абразивной поверхности, а именно: круговые движения, линейные перемещения, движения по траектории "восьмерки", а также комбинированный метод, включающий круговые движения со смещённым вектором давления для целенаправленного изменения геометрии торцевой поверхности.

Наибольшую эффективность в коррекции смещения апекса (Apex Offset) показал комбинированный метод, основанный на круговой траектории с целенаправленным смещением вектора прикладываемого давления в сторону, противоположную измеренному смещению вершины. Данная методика позволяет локально усиливать процесс абразивного износа на требуемом участке торца ферулы.

Количественный анализ результатов, показал, что предложенная методика ручной полировки позволяет в 80 % случаев снизить величину смещения апекса с  $\sim 300$  нм до значений в диапазоне 30 - 50 нм. Это свидетельствует о высокой воспроизводимости и эффективности метода.

Полученные результаты (рис. 1) выявили ряд важных закономерностей. Прежде всего, достижение полной эффективности коррекции не было получено даже при использовании автоматизированной установки, обеспечивающей высокую повторяемость процесса. Этот факт свидетельствует о влиянии на результат иных параметров. Кроме того, для оставшихся образцов последующие попытки полировки не привели к значительному улучшению. Это позволяет предположить, что причиной их стойкости к коррекции являются не случайные отклонения в процессе, а более фундаментальные факторы: 1) ограничения процесса производства – дефекты на границе раздела волокна и ферулы, некачественная вклейка, смещения при вклейке; 2) предел плоской полировки; 3) недостаточная эффективность абразива для исправления глубокого дефекта или сама глубина дефекта.

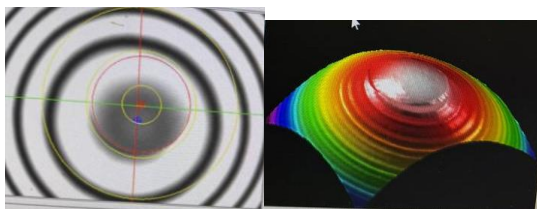


Рис. 1. Результаты работы алгоритма

#### Список литературы

1. Wang S., et.al. // Appl. Opt. 2004. V. 43. P. 49-56.
2. Веб ресурс: [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=12195](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=12195).
3. Yildirim M., et.al. // Optics and Laser Technology. 2016. V. 85. P. 19-29.

И.А. ПОПОВ<sup>1,2</sup>, Д.Е. АРТЕМОВ<sup>2</sup>, А.А. КОНДАКОВ<sup>2</sup>,  
В.Н. ТРЕЩИКОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

<sup>2</sup>Группа компаний Т8, Москва

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОДОБРОТНЫХ МИКРОКОЛЬЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ НА ФОТОННЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ**

Экспериментально исследовано изменение ключевых параметров микрокольцевых резонаторов на основе SiN при их локальном нагреве. Показана линейная зависимость положения резонансов и независимость остальных параметров МКР от мощности нагревателя.

I.A. POPOV<sup>1,2</sup>, D.E. ARTEMOV<sup>2</sup>, A.A. KONDAKOV<sup>2</sup>,  
V.N. TRESHCHIKOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

<sup>2</sup>Group of companies «T8», Moscow

## **INVESTIGATION OF THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE PARAMETERS OF HIGH-QUALITY MICRO-RING RESONATORS ON PHOTONIC INTEGRATED CIRCUITS**

Presents experimental investigation of changing key parameters of SiN-based micro-ring resonators during their local heating. The linear dependence of the position of the resonances and the independence of the remaining parameters of the micro-ring resonators on the heater power is shown.

Интегральные микрокольцевые резонаторы (МКР) – широко используемый элемент интегральной фотоники в задачах фильтрации и модуляции лазерного излучения. В целях создания перестраиваемого узкополосного лазерного источника [1] на основе МКР на SiN актуально исследование температурных зависимостей параметров МКР по аналогии с МКР на основе технологии «кремний-на-изоляторе» [2].

В данной работе исследована температурная зависимость параметров одного образца МКР путём аппроксимации экспериментально измеренных спектров пропускания при различных мощностях нагревательного элемента. Схема экспериментальной установки приведена на рис 1. Для аппроксимации спектров пропускания МКР используется модельная функция [3]:

$$T_{MR}(\lambda) = \frac{a^2 - 2at \cdot \cos \theta + t^2}{1 - 2at \cdot \cos \theta + (at)^2}, \quad \theta \equiv 2\pi \frac{\lambda - \lambda_{MR}}{\Delta\lambda_{MR}},$$

где  $\lambda_{MP}$  – резонансная длина волны МКР;  
 $\Delta\lambda_{MP}$  – область свободной дисперсии МКР;  
 $a, t$  – амплитудные коэффициенты однократного прохождения МКР и участка связи, соответственно. При аппроксимации также учитывается влияние паразитных модуляций [2]. Из рис. 2 видно, что чувствительность положения и глубины резонанса варьируется от резонанса к резонансу.

По результатам измерения и аппроксимации, резонансов МКР в широком диапазоне длин волн (1530 - 1620 нм) показана температурная зависимость ключевых параметров МКР –  $\partial\lambda_{MP} \equiv \lambda_{MP}(P) - \lambda_{MP}(0)$ ,  $a, t$  от мощности нагревателя  $P$  (рис. 3). Показано, что в исследуемом диапазоне  $P$  смещение  $\partial\lambda_{MP}$  резонанса линейно. В то же время наблюдаемое изменение параметров ( $a, t$ ) при исследуемом нагреве может быть обусловлено как влиянием температуры, так и неточностью эксперимента. Тем не менее наблюдается высокая локальная температурная чувствительность глубины резонансов МКР (центральная группа резонансов на рис. 2), объяснение причин которой предполагается авторами данной работы в ближайшем будущем.

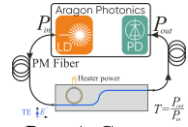


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

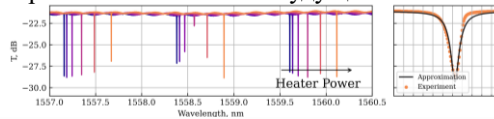


Рис. 2. Экспериментально измеренные спектры пропускания при различных мощностях джоулевых нагревателей (слева) и пример аппроксимации резонанса МКР модельной функцией (справа)

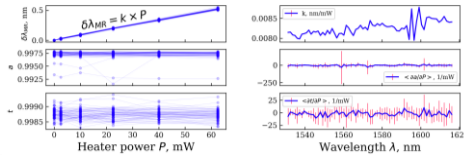


Рис. 3. Зависимость значений параметров МКР от мощности нагревателя (слева) и средние значения коэффициентов пропорциональности параметров к мощности нагревателя (справа)

#### Список литературы

1. Artemov D.E., et al. // Laser Physics Letters. 2025. V. 22. No. 11.
2. Strain M.J., et al. // Optics Letters. 2015. V. 40. No. 7. P. 1274-1277.
3. Артемов Д.Е. и др. // Журнал технической физики. 2025. Т. 95. № 6. С. 1183-1190.

П.В. ЖОРОВ, В.А. ПЕТРОВ, С.И. ЗИМИН  
*Московский технический университет связи и информатики*

## **АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ Li-Fi В ГИБРИДНЫХ КОРПОРАТИВНЫХ ИНФРАСТРУКТУРАХ**

Приведена сокращённая аналитическая оценка применимости технологии Li-Fi в корпоративных гибридных сетях. Обобщены ключевые стандарты оптической беспроводной связи (IEEE 802.15.7, IEEE 802.15.13, ITU-T G.9991, IEEE 802.11bb), рассмотрены их возможности, ограничения и роль в формировании интегрированных корпоративных решений совместно с Wi-Fi и 5G. Показано, что Li-Fi обладает высокой скоростью, устойчивостью к электромагнитным помехам и повышенной безопасностью, однако требует прямой видимости и наличия плотной сети оптических точек доступа. Установлено, что технология наиболее эффективна при использовании в составе гибридной архитектуры и перспективна для систем 6G и IoT.

P.V. ZHOROV, V.A. PETROV, S.I. ZIMIN  
*Moscow Technical University of Communications and Informatics*

## **ANALYTICAL ASSESSMENT OF THE APPLICATION OF Li-Fi IN HYBRID CORPORATE INFRASTRUCTURES**

A concise analytical assessment of the applicability of Li-Fi technology in corporate hybrid networks is presented. Key optical wireless communication standards (IEEE 802.15.7, IEEE 802.15.13, ITU-T G.9991, IEEE 802.11bb) are summarized, and their capabilities, limitations, and roles in the formation of integrated corporate solutions together with Wi-Fi and 5G are examined. It is shown that Li-Fi provides high data rates, resistance to electromagnetic interference, and enhanced security, but requires line-of-sight conditions and a dense deployment of optical access points. It is established that the technology is most effective when used as part of a hybrid architecture and is promising for 6G and IoT systems.

Корпоративные сети испытывают рост нагрузок, дефицит радиочастотного спектра и повышенные требования к безопасности. В этих условиях возрастает значение Li-Fi – оптической беспроводной технологии, использующей модулированное излучение видимого и инфракрасного диапазонов. Она обеспечивает широкую полосу пропускания и помехоустойчивость, однако требует прямой видимости и ограничена зоной действия одной оптической ячейки, что делает её элементом гибридной сетевой архитектуры.

Техническую основу Li-Fi формируют стандарты IEEE 802.15.7, IEEE 802.15.13 и ITU-T G.9991, определяющие параметры высокоскоростной оптической связи в помещении и на средних дистанциях. Существенным этапом развития стало появление IEEE 802.11bb, позволяющего интегрировать Li-Fi в инфраструктуру Wi-Fi и обеспечивать совместную работу оптического и радиоканалов. Сравнение Li-Fi с Wi-Fi и 5G показывает, что оптическая технология обладает высокой потенциальной пропускной способностью и возможностью плотного повторного использования канала. Отсутствие радиопомех делает её устойчивой в загруженной корпоративной среде. Однако радиотехнологии обеспечивают лучшее покрытие и мобильность, поэтому Li-Fi не может выступать единственным средством связи. Исследования гибридных систем показали, что совмещение Li-Fi, Wi-Fi и 5G повышает производительность и обеспечивает автоматическое распределение трафика. Li-Fi ценен высокой скоростью и конфиденциальностью, но чувствителен к блокировкам светового потока. Для устойчивой работы требуется перекрытие зон нескольких оптических точек и автоматический переход на радиоканал при потере линии видимости. Дополнительным ограничением остаётся отсутствие Li-Fi-модулей в массовых устройствах.

В перспективе сетей 6G Li-Fi рассматривается как компонент для достижения терабитных скоростей, особенно при использовании лазерных источников света. Технология также способна разгрузить радиоспектр при массовом подключении IoT-устройств. Анализ показывает, что Li-Fi обладает существенными преимуществами в локальных корпоративных сценариях, но требует гибридной архитектуры. Стандарты IEEE 802.15.7, IEEE 802.15.13, ITU-T G.9991 и IEEE 802.11bb обеспечивают основу для масштабирования Li-Fi в корпоративные сети нового поколения.

#### *Список литературы*

1. Haas H., et al. What is Li-Fi? // J. of Lightwave Techn. 2016. V. 34, No. 6. P. 1533-1544.
2. Choi C.Q. Wi-Fi boosts new, ultrafast Li-Fi standards // IEEE Spectrum. 2023.
3. Besjedica T., et al. Evolution of Hybrid Li-Fi–WiFi Networks: A Survey // Sensors. 2023.
4. IEEE Std 802.15.7-2018.
5. IEEE Std 802.15.13-2023.
6. ITU-T Recommendation G.9991. 2019.
7. Linnartz J.-P. et al. ITU News. 2020.
8. Cogalan T., et al. 5G-CLARITY // IEEE Communications Magazine. 2022.
9. Soltani M.D., et al. // IEEE Wireless Communications. 2023.
10. Петров В.А., Зайцев Д.В., Зимин С.И. Реализация алгоритмов демодуляции для Li-Fi систем. 2025.

Е.П. ПАНТЕЛЕЕВА<sup>1</sup>, Е.А. МЕЛЬНИКОВА<sup>1</sup>, Д.В. ГОРБАЧ<sup>1</sup>,  
А.Л. ТОЛСТИК<sup>1</sup>, С.С. СЛЮСАРЕНКО<sup>2</sup>, А. КАРАБЧЕВСКАЯ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск

<sup>2</sup>Университет Гриффита, Брисбен, Австралия

<sup>3</sup>Университет им. Д. Бен-Гуриона, Беэр-Шева, Израиль

## **ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ ЗОННАЯ ПЛАСТИНКА ФРЕНЕЛЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАЗОВОЙ ТОПОЛОГИИ ОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ**

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований распределения интенсивности фазового сингулярного пучка в фокальной плоскости электрически переключаемой жидкокристаллической зонной пластинки Френеля. Предложен метод определения устойчивости и фазовой топологии сингулярных пучков. Показано, что проявление астигматизма позволяет проводить одновременный анализ знака и величины топологического заряда оптического вихря без внесения дополнительных элементов в оптическую схему.

K.P. PANTSIALEYEVA<sup>1</sup>, E.A. MELNIKOVA<sup>1</sup>, D.V. GORBACH<sup>1</sup>,  
A.L. TOLSTIK<sup>1</sup>, S.S. SLUSSARENKO<sup>2</sup>, A. KARABCHEVSKY<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State University, Minsk

<sup>2</sup>Griffith University, Brisbane, Australia

<sup>3</sup>Ben-Gurion University of the Negev, Beer-Sheva, Israel

## **FRESNEL LIQUID CRYSTAL ZONE PLATE FOR DETERMINING OPTICAL VORTEX PHASE TOPOLOGY**

The results of theoretical and experimental studies of the intensity distribution of a phase singular beam in the focal plane of an electrically switchable liquid crystal Fresnel zone plate are presented. A method for determining the stability and phase topology of singular beams is proposed. It is shown that the presence of astigmatism allows for the simultaneous analysis of the sign and magnitude of the topological charge of an optical vortex without introducing additional elements into the optical circuit.

Среди многообразия пучков со сложным амплитудно-фазовым распределением выделяют фазовые сингулярные пучки (вortexы, оптические вихри), которые нашли широкое применение в различных областях науки и техники: в системах оптической связи и манипулирования микрообъектами, при исследовании атмосферы, для эффективной обработки материалов, кодирования информации [1].

Несмотря на разнообразие современных методов создания фазовых сингулярных пучков, неизбежные погрешности оптических элементов приводят к появлению фонового когерентного поля, которое дестабилизирует оптические вихри с высокими топологическими зарядами ( $|\ell| > 1$ ), вызывая их распад в дальнем поле на отдельные вихреки с единичными зарядами, количество которых соответствует исходного топологическому заряду [2, 3]. Актуальной задачей является разработка простых экспериментальных методов анализа фазовой топологии вихреков, позволяющих проводить измерения без изменения оптических схем, что существенно ограничивает область применения сингулярных пучков при использовании топологического заряда в качестве информационного параметра.

В работе использована оригинальная топология ориентации нематического жидкого кристалла (НЖК) в электрически управляемой линзе Френеля, работающей в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра [4]. Ахроматические свойства достигаются за счёт чередующихся областей (колец) с планарной и твист ориентациями директора НЖК. Экспериментально показано (рис. 1), что при падении излучения на линзу Френеля в фокальной плоскости формируется пространственное распределение интенсивности в виде отдельных максимумов, количество которых соответствует величине топологического заряда. Теоретическое моделирование фокусировки сингулярного пучка посредством использования фурые-преобразования подтвердило экспериментальные результаты и позволило оптимизировать угол наклона светового пучка относительно плоскости зонной пластинки Френеля.

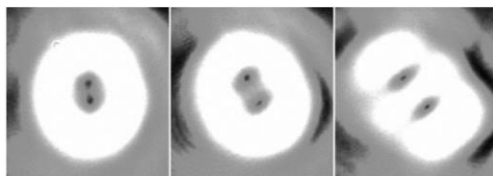


Рис. 1. Экспериментальные результаты фурые-преобразования волнового фронта сингулярного пучка с топологическим зарядом  $\ell = -2$  при угле падения излучения на линзу Френеля 0, 5 и 10 градусов (слева направо)

#### *Список литературы*

1. Padgett M.J. // Optics Express. 2017. V. 25 (10). P. 11265-11274.
2. Berry M.V., Dennis M.R. // Proc. R. Soc. Lond. A. 2001. V. 457 (2013). P. 2251-2263.
3. Basistiy I.V., Bazhenov V.Yu., Soskin M.S., Vasnetsov M.V. // Opt. Commun. 1993. V. 103. P. 422-428.
4. Melnikova E.A., et al. // J. Appl. Spectrosc. 2024. V. 91 (23). P. 1-6.

И.Г. СТЕПАНОВ, А.В. ЧЕРНЫХ, Т.В. РЕЗЦОВ, Т.Н. ОРЛОВА<sup>1</sup>,  
Н.В. ПЕТРОВ

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

*<sup>1</sup>Ереванский государственный университет, Армения*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ХРОМАТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ СТРУКТУР В ХИРАЛЬНЫХ НЕМАТИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ**

В данной работе проведено исследование торонов, сформированных в гомеотропных ячейках с хиральными нематическими жидкими кристаллами. Цель работы заключается в установлении влияния длины волны на оптические характеристики торонов разного размера. Исследовались ячейки с толщиной 10, 25 и 50 мкм. Для анализа использовался поляризационный голографический микроскоп. Исследование характеристик проводилось с использованием когерентных источников на длинах волн 450, 532 и 660 нм. В результате были получены полные матрицы Джонса и восстановлены оптические свойства торонов, установлена их зависимость от длины волны.

I.G. STEPANOV, A.V. CHERNYKH, T.V. REZTSOV, T.N. ORLOVA<sup>1</sup>,  
N.V. PETROV

*ITMO University, Saint Petersburg*

*<sup>1</sup>Yerevan State University, Armenia*

## **STUDY OF CHROMATIC PROPERTIES OF TOPOLOGICAL STRUCTURES IN CHIRAL NEMATIC LIQUID CRYSTALS**

This work presents a study of torons formed in homeotropic cells with chiral nematic liquid crystals. The aim of the study is to determine the influence of the wavelength on the optical characteristics of torons of different sizes. Cells with thicknesses of 10, 25, and 50  $\mu\text{m}$  were investigated. The analysis was performed using a polarization holographic microscope. The characterization was carried out using coherent light sources at wavelengths of 450, 532 and 660 nm. As a result, the complete Jones matrices were obtained, and the optical properties of the torons were retrieved, establishing their dependence on the wavelength.

Самоорганизующиеся топологические структуры в хиральных нематических жидких кристаллах (ЖК) представляют интерес в качестве микрооптических элементов, которые позволяют динамически управлять амплитудой, фазой и поляризацией света. Значимым преимуществом является способность выступать в роли универсальных, перестраиваемых



компонентов. Одной из наиболее легко воспроизводимых структур являются тороны, которые формируют локализованные оптически активные области с размером порядка толщины ЖК-ячейки. Тороны могут применяться, например, в качестве линз, дифракционных решёток, генераторов вихревых пучков. Для анализа таких структур (в том числе в реальном времени) может быть использован поляризационный голографический микроскоп (ПГМ). В результате измерений мы восстанавливаем матрицы Джонса, которые в свою очередь предоставляют полную информацию о пространственном распределении амплитудно-фазовых и поляризационных характеристик полученной структуры. Для регистрации голограмм использовался модифицированный ПГМ, который был представлен в работе [1].

Проведено исследование самоорганизующихся топологических структур (торонов) в гомеотропных ячейках нематического ЖК различной толщины. Для исследования использовался ПГМ на базе интерферометра Маха-Цендера во внеосевой конфигурации. Установка позволяет за один экспозиционный кадр восстановить полную матрицу Джонса анизотропных образцов. Образцы одновременно освещались когерентными источниками трёх длин волн: 450 нм (синий), 532 нм (зелёный) и 660 нм (красный). В качестве хиральных ЖК-образцов была взята смесь жидкого кристалла 5CB (Merck KggA) и хиральной добавки S811 (HCCN, China, CAS 87321-20-8). Размеры структур контролировались толщиной ЖК-ячейки: 10, 25 и 50 мкм. Эксперименты проводились в стандартных условиях ( $\sim 23^\circ\text{C}$ ).

В результате экспериментов получены матрицы Джонса, из которых были восстановлены оптические свойства торонов: круговой дихроизм, круговое запаздывание фазы, ориентация собственных осей; получены их зависимости от длины волны.

Авторы выражают благодарность за финансовую поддержку Министерству науки и высшего образования Российской Федерации (№ FSER-2025-0007).

#### *Список литературы*

1. Reztsov T.V., et al. // Polymers. 2025. V. 17 (13). P. 1849.

У.Дж. РАХИМОВА<sup>1</sup>, М.Н. ЕРОВ<sup>1</sup>, Б.И. МАХСУДОВ<sup>2</sup>,  
М.Х. ЭГАМОВ<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Худжандский научный центр Национальной академии наук Таджикистана*

<sup>2</sup>*Таджикский национальный университет, Душанбе, Таджикистан*

<sup>3</sup>*Горно-металлургический институт Таджикистана, Бустон*

## **КОНЦЕНТРАЦИОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ В ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЁНКАХ С ПОЛИМЕРНОЙ ДИСПЕРСИЕЙ**

Полимерно-дисперсные жидкокристаллические плёнки типа «гость-хозяин» (ПДЖК) получены с использованием нематического жидкого кристалла (НЖК), поливинилового спирта (ПВС) и цетилтриметиламмоний бромида (ЦТАБ) методом фазового разделения, вызванного полимеризацией (PIPS). Катионное поверхностно-активное вещество (ПАВ) было взято в качестве «гостя» в ПДЖК-«хозяине». Показали, что в отсутствие электрического поля капли жидких кристаллов (ЖК) в полимерной матрице демонстрируют биполярную конфигурацию, однако, при более высоком поле наблюдаются структура типа мальтийского креста. Установили, что плёнка ПДЖК с 1 %-ным сурфактантом демонстрируют высокую светопропусканию и быстрое время отклика по сравнению с плёнками, содержащие 2 % и 4 % ПАВ.

U.J. RAKHIMOVA<sup>1</sup>, M.N. YOROV<sup>1</sup>, B.I. MAKHSUDOV<sup>2</sup>,  
M.Kh. EGAMOV<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Khujand Scientific Center of the National Academy of Tajikistan*

<sup>2</sup>*Tajik National University, Dushanbe, Tajikistan*

<sup>3</sup>*Mining and Metallurgical Institute in Tajikistan, Buston*

## **CONCENTRATION DEPENDENCE OF SURFACTANTS IN LIQUID-CRYSTALLINE FILMS WITH POLYMER DISPERSION**

Polymer-dispersed liquid crystal films of the «guest-host» type (PDLC) were obtained using nematic liquid crystal (NLC), polyvinyl alcohol (PVA), and cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) by the phase separation induced by polymerization (PIPS). The cationic surfactant was taken as a «guest» in the PDLC «host». It was shown that in the absence of an electric field, liquid crystal (LC) droplets in a polymer matrix exhibit a bipolar configuration, but a higher field results in a maltese cross-like structure. It was also found that PDLC films with 1 % surfactant exhibit high light transmission and fast response times compared to films containing 2 % and 4 % surfactant.

Плѐнки на основе комбинации полимеров и жидких кристаллов (ЖК) представляют новый класс материалов для оптоэлектроники и фотоники, в которых капли ЖК размером 3 - 5 мкм и менее, диспергированы в оптически прозрачной полимерной матрице [1]. Они представляют большой научный интерес для модуляции мощных лазерных излучений, из-за реализации в качестве оптических переключателей, микрополяризаторов в ЖК-дисплеях большой площади [2]. В [2 - 4] мы провели экспериментальные исследования по ИК-спектроскопии поглощения, методу улучшения коэффициента контрастности, оптическим свойствам плѐнок ПДЖК, легированных сурфактантом в виде красителей, в неориентированных и ориентированных конфигурациях. Но не было приложено особых усилий для изучения морфологии капель ЖК, легированных сурфактантом и их электрохимического воздействия на оптическом отклике. В этой работе мы сообщаем о результатах, полученных на основе электрооптических характеристик плѐнок ПДЖК в зависимости от концентрации поверхностно-активных веществ (ПАВ). Было исследовано влияние концентрации ПАВ на морфологию ЖК-капель, свойства пропускания, реакцию переключения и термооптические свойства и проведено сравнение с чистой (исходной) плѐнкой.

Установили, что при увеличении концентрации ПАВ (с 1 до 4 %) поглощение в 4 % образце ПДЖК выше, чем в 2 и 1 % образцах. Мы предполагаем, что более высокое поглощение при 4 % концентрации ПАВ приводит к более низкому светопропусканию от плѐнки типа «гость-хозяин». Обнаружено, что оптическое пропускание нелинейно возрастает при более низком напряжении, но при более высоком напряжении наблюдается резкое увеличение пропускания преимущественно из-за изменения морфологии капель и сильного выравнивания молекул ЖК с внешним полем.

Предложен вывод, что 1 % образец, легированный ПАВ, демонстрирует более высокую светопрозрачность, чем 4 % образец, из-за минимального поглощения в 1 % образце ПДЖК. Минимальное пропускание в 4 % образце также может быть связано с трудностью ориентации молекулы ЖК из одного состояния в другое из-за повышенной вязкости композитной плѐнки.

#### *Список литературы*

1. Gray G.W., Harrison K.J., et al. // Electron. Lett. 1973. V. 9 (6). P. 130.
2. Лойко В.А., Зырянов В.Я. и др. // Оптика и спектроскопия. 2020. Т. 128 (3) С. 343.
3. Egamov M.Kh., Makhsudov B.I., et al. // Eng. and Tech. Journal. 2025. V. 10 (4). P. 4359.
4. Egamov M.Kh., Makhsudov B.I., et al. // Bulletin of the Tajik national university. Series of natural sciences. 2024. No. 2. P. 56.

Д.А. ПРОСКУРЯКОВ, Д.М. ЧУБАРОВ, Ю.А. АЛТУХОВ,  
Д.С. РАСТРЫГИН, В.О. ДОЛГИРЕВ, С.Н. ШАРАНГОВИЧ

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ФОРМИРОВАНИЯ ЧИРПИРОВАННЫХ ДВУХСЛОЙНЫХ КПЖК ДИФРАКЦИОННЫХ СТРУКТУР**

Приведены результаты численного моделирования процессов формирования чирпированных двухслойных дифракционных структур в капсулированных полимером нематических жидких кристаллах. Произведена оценка неоднородности пространственного профиля показателя преломления двухслойной структуры от коэффициента поглощения материала и режима записи.

D.A. PROSKURYAKOV, D.M. CHUBAROV, Yu.A. ALTUKHOV,  
D.S. RASTRYGIN, V.O. DOLGIREV, S.N. SHARANGOVICH

*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*

## **INVESTIGATION OF THE HOLOGRAPHIC FORMATION PROCESS OF CHIRPED TWO-LAYER PDLC DIFFRACTION STRUCTURES**

The results of numerical modeling of the formation of chirped two-layer diffraction structures in nematic liquid crystals encapsulated by a polymer are presented. The inhomogeneity of the spatial profile of the refractive index of a two-layer structure from the absorption coefficient of the material and the recording mode is estimated.

Многослойные неоднородные голографические дифракционные структуры перспективны для создания управляемых дифракционных оптических элементов [1, 2]. Использование капсулированных полимером нематических жидких кристаллов (КПЖК) [3] позволяет управлять их дифракционными свойствами за счёт воздействия внешнего электрического поля. Применение метода чирпирования при формировании таких структур увеличивает ширину угловой селективности за счёт изменения периода вдоль вектора решётки. При этом неоднородность профиля показателя преломления существенно влияет на их оптические характеристики, как было показано в работе [1].

Целью работы является исследование формирования двухслойных голографических дифракционных структур в КПЖК при различных

коэффициентах поглощения и режимах записи на основе ранее разработанной математической модели [2].

На рис. 1 представлены зависимости двумерной неоднородности профиля показателя преломления ( $\Delta n$ ) для первого и второго слоя, рассчитанные по следующей формуле:

$$\Delta n = \left( \sigma(n_{N_x, N_y}) / \max[n_{N_x, N_y}] \right) \cdot 100\%,$$

где  $n_{N_x, N_y}$  – матрица значений двумерного пространственного профиля показателя преломления;  $\sigma(n_{N_x, N_y})$  – среднеквадратичное отклонение.

Параметры моделирования: толщина дифракционного слоя  $d = 15$  мкм; длина волны  $\lambda = 633$  нм; углы падения записывающих пучков  $\theta_{\text{пад}} = \pm 10^\circ$ ; коэффициент диффузии  $D_M^{n,m} = D_{LC}^{n,m} = 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с; значение квадратичного члена фазового профиля записывающего излучения  $\varphi'' = 10^{10}$ .

Установлено, что при линейном режиме записи ( $b > 1$ ) величина двумерной неоднородности существенно ниже, чем при нелинейном ( $b < 1$ ). Для второго дифракционного слоя при увеличении коэффициента поглощения материала в диапазоне параметра  $b$  от 0,1 до 1 наблюдается резкое снижение уровня двумерной неоднородности профиля структуры, что связано с уменьшением интенсивности записывающего поля на втором слое и усилением вклада диффузионного механизма записи.

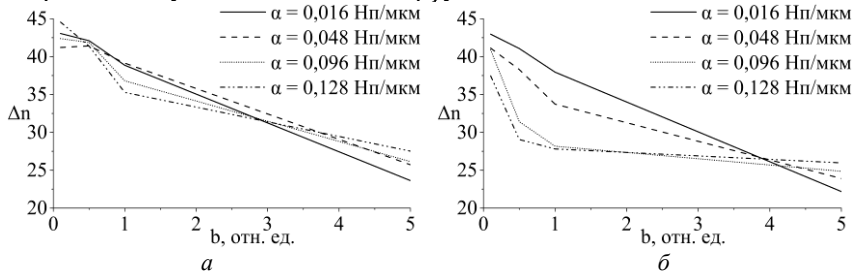


Рис. 1. Зависимость неоднородности пространственного профиля амплитуды первой гармоники показателя преломления первого (а) и второго (б) слоя

#### Список литературы

1. Dolgirev V.O., Sharnagovich S.N. Multilayered inhomogeneous holographic diffraction structures in photopolymerizing compositions with liquid crystals // Russian Physics Journal. 2022. V. 65. P. 1246-1256.
2. Sharangovich S.N., et al. // Optics and Spectroscopy. 2025. V. 133 (4). P. 359–368.
3. Sutherland R.L. Polarization and switching properties of holographic polymer-dispersed liquid-crystal gratings. I. Theoretical model // Journal of the Optical Society of America B. 2002. V. 19. No. 12. P. 2995-3003.

К.А. МАРИНИЧЕВА, А.И. ИВАНОВА, А.М. ИВАНОВ,  
И.А. КАПЛУНОВ

*Тверской государственный университет*

## **ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНАМИ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ И ГЕРМАНИЯ**

Приведены результаты экспериментального исследования воздействия электронов с энергией 30 кэВ на параметры шероховатости поверхности и оптическое пропускание ИК-излучения монокристаллов германия и кремния.

К.А. MARINICHEVA, A.I. IVANOVA, A.M. IVANOV,  
I.A. KAPLUNOV

*Tver State University*

## **EFFECT OF ELECTRON IRRADIATION ON OPTICAL PROPERTIES OF SILICON AND GERMANIUM CRYSTALS**

The experimental study results of the impact of electrons with an energy of 30 keV on the surface roughness parameters and optical transmittance of IR radiation of silicon and germanium single crystals are presented.

Исследование изменений, происходящих на поверхности и в объёме функциональных кристаллических материалов в результате облучения потоком заряженных частиц (электронов и ионов), имеет важное прикладное значение. Обработка поверхности металлов, полупроводников, полимеров пучками заряженных частиц различной интенсивности позволяет модифицировать как структуру поверхности, так и структурно чувствительные свойства (прочность, электрофизические и оптические свойства) [1, 2], а также учитывать применение материалов в среде с наличием воздействия высокоэнергетических заряженных частиц.

Целью работы является анализ воздействия электронов на микроструктуру поверхности и оптическое пропускание ИК-излучения кристаллов германия (Ge) и кремния (Si).

В работе были исследованы монокристаллы германия и кремния кристаллографической ориентации (111), полученные методом Чохральского и подготовленные для спектральных измерений. Облучение поверхности кристаллов электронами проводилось в растровом

электронном микроскопе JEOL 6610 LV. Генерация электронного пучка осуществлялась с помощью термоэмиссионного вольфрамового катода, энергия пучка электронов – 30 кэВ, время воздействия – 10 мин, ток зонда – 30 нА. Измерения спектров пропускания исходных и облученных электронами кристаллов германия и кремния проводились при  $T = 300$  К на спектрометре ИК фурье-спектрометре Тензор 27 в интервале длин волн 1,2 - 25 мкм. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что десятиминутное воздействие облучения электронами приводит к кратковременному сглаживанию поверхности (уменьшению глубины впадин и высоты пиков) исследуемых кристаллов, что обуславливает повышение коэффициента оптического пропускания германия и кремния (рис. 1 и 2, табл. 1).

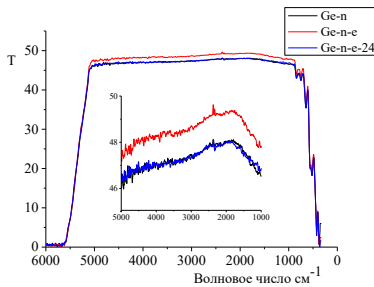


Рис. 1. Спектры оптического пропускание образцов Ge(n)

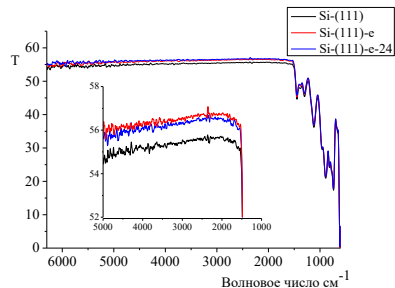


Рис. 2. Спектры оптического пропускание образцов Si(p)

Таблица 1. Коэффициенты оптического пропускания образцов

| Образец            | $T_{\max}$ , %<br>исходный | $T_{\max}$ , %<br>после электрон. | $T_{\max}$ , %<br>после электрон. и 24 ч. |
|--------------------|----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------|
| Ge-n ( $h = 5$ мм) | 47,9                       | 49,2                              | 47,9                                      |
| Si-p ( $h = 5$ мм) | 55,6                       | 56,7                              | 56,5                                      |

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 0817-2023-0006) с использованием ресурсов Центра коллективного пользования Тверского государственного университета.

#### Список литературы

1. Гэн Я., Панченко И.А., Чэнь С.И др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2021. № 5. С. 42–46.
2. Вабищевич С.А., Вабищевич Н.В., Бринкевич Д.И. // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. 2010. №. 3. С. 109-114.

А.О. ЗЛОБИН, Д.Я. ФАЛЬКОВ, Э.Р. КАЛИМУЛЛИН,  
Н.И. БУРИМОВ, С.М. ШАНДАРОВ, А.А. ШМИДТ, Н.Н. ЮДИН<sup>1,2</sup>,  
С.Н. ПОДЗЫВАЛОВ<sup>1</sup>, М.А. БРЮШИНИН<sup>3</sup>, И.А. СОКОЛОВ<sup>3</sup>

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники*

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский Томский государственный университет*

<sup>2</sup>*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск*

<sup>3</sup>*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург*

## **ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ТЕМНОВОЙ ПРОВОДИМОСТИ КРИСТАЛЛА ZnGeP<sub>2</sub>**

Представлены результаты экспериментального исследования температурной зависимости электропроводности нелинейного кристалла ZnGeP<sub>2</sub>. Получено, что в диапазоне температур от 25 до 50 °С проводимость имеет темновой характер, с энергией активации 0,53 эВ.

A.O. ZLOBIN, D.Ya. FAL'KOV, E.R. KALIMULLIN, N.I. BURIMOV,  
S.M. SHANDAROV, A.A. SHMIDT, N.N. YUDIN<sup>1,2</sup>,  
S.N. PODZYVALOV<sup>1</sup>, M.A. BRYUSHININ<sup>3</sup>, I.A. SOKOLOV<sup>3</sup>

*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*

<sup>1</sup>*National Research Tomsk State University*

<sup>2</sup>*V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the RAS, Tomsk*

<sup>3</sup>*Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS, Saint Petersburg*

## **TEMPERATURE DEPENDENCE OF DARK CONDUCTIVITY OF ZnGeP<sub>2</sub> CRYSTAL**

We present the result of experimental investigation of temperature dependency of an electroconductivity for ZnGeP<sub>2</sub> nonlinear crystal. It was shown that this conductivity has the dark nature within temperature range from 25 to 50 °C with an activation energy equal to 0.53 eV.

ZnGeP<sub>2</sub> является перспективным нелинейным материалом для параметрической генерации излучения в диапазоне длин волн от 2 до 12 мкм [1]. Наблюдаемые в кристаллах ZnGeP<sub>2</sub> электрооптический [2] и фоторефрактивный [3] эффекты свидетельствуют о дополнительных возможностях его использования, в частности, для модуляции лазерного излучения и записи динамических голограмм.

Важным параметром кристаллов для таких приложений является их темновая проводимость, температурная зависимость которой исследуется



в данном сообщении для образца  $\text{ZnGeP}_2$ , выращенного вертикальным методом Бриджмена на затравку [4] в ООО «ЛОК». Эксперимент проводился на монокристаллических образцах с размерами  $5.0 \times 5.8 \times 5.7 \text{ мм}^3$  по кристаллографическим направлениям  $[001]$ ,  $[110]$  и  $\bar{1}\bar{1}10$ . К индиевым электродам, нанесённым на плоскости  $\{001\}$ , через резистор  $R_n = 330 \text{ кОм}$ , как показано на схеме установки, приведённой на рис. 1, подавалось напряжение  $U_0 = 540 \text{ В}$ , контроль которого осуществлялся вольтметром В7-40. Кристалл нагревался расходящимся потоком горячего воздуха, с регулировкой расстояния между его источником 1 и одной из граней кристалла, параллельной оси  $[001]$ . Температура контролировалась термопарой, входящей в комплект цифрового мультиметра МУ-64.

Рассчитанные из экспериментальных данных величины темновой проводимости  $\sigma_d$ , соответствующие значениям параметра  $1000/T$ , где  $T$  – абсолютная температура кристалла, представлены точками на рис. 2. Из него следует, что температурная зависимость  $\sigma_d(T)$  удовлетворительно описывается уравнением Аррениуса для энергии активации  $E_a = 0,53 \text{ эВ}$ .

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

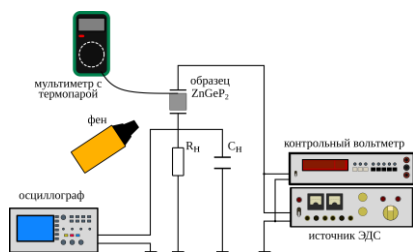


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

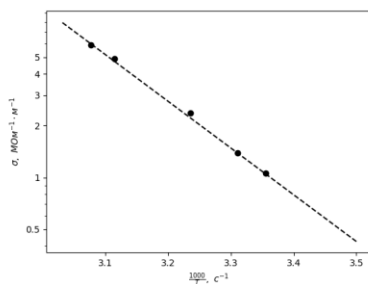


Рис. 2. Температурная зависимость темновой проводимости

#### Список литературы

1. Верозубова Г.А. и др. // Кристаллография. 2010. Т. 55. № 1. С. 68-74.
2. Turner E.H., et al. // Physical Review B. 1974. V. 9. No. 2.
3. Караваев П.М. и др. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 11.
4. Verozubova G. A., et al. // Inorganic Materials. 2007. V. 43. No. 10. P. 1040.

О.В. ТОККО<sup>1</sup>, Е.В. ЗАЗУЛЯ<sup>1</sup>, А.В. КАДЕТОВА<sup>1,2</sup>,  
М.Н. ПАЛАТНИКОВ<sup>2</sup>, Р.А. ТИТОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Петрозаводский государственный университет*

<sup>2</sup>*Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья  
им. И.В. Тананаева Кольского научного центра РАН, Апатиты, Мурманская обл.*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРУКТУРЫ КРИСТАЛЛОВ $\text{LiNbO}_3\text{:Zn:B}$**

Методом полнопрофильного анализа рентгенограмм определена дефектная структура кристаллов двойного легирования  $\text{LiNbO}_3\text{:Zn:B}$ . Установлено, что цинк занимает литиевый и пустой кислородный октаэдр в структуре. Кристалл с концентрацией цинка 3.03 мол. % имеет наименьшее количество дефектов.

O.V. TOKKO<sup>1</sup>, E.V. ZAZULYA<sup>1</sup>, A.V. KADETOVA<sup>1,2</sup>,  
M.N. PALATNIKOV<sup>2</sup>, R.A. TITOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Petrozavodsk State University*

<sup>2</sup>*I.V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral  
Raw Material of Kola Science Center of the RAS, Apatity, Murmansk region*

## **STUDY OF STRUCTURAL FEATURES OF $\text{LiNbO}_3\text{:Zn:B}$ CRYSTALS**

Using full-profile X-ray diffraction analysis, the defect structure of double-doped  $\text{LiNbO}_3\text{:Zn,B}$  crystals was determined. It was found that zinc occupies the lithium octahedron and the empty oxygen octahedron in the structure. The crystal with a zinc concentration of 3.03 mol. % has the lowest number of defects.

Цинк является классической примесью [1], подавляющей эффект фоторефракции в кристаллах ниобата лития. Легирование бором в небольших количествах приводит к увеличению степени упорядочения основных и легирующих катионов вдоль полярной оси кристалла, снижению концентрации точечных дефектов  $\text{Nb}_{\text{Li}}$  и приближению величины  $R = \text{Li/Nb}$  к 1 [2]. Для эффективного управления оптическими характеристиками кристаллов важно знать тип и пространственное распределение собственных и примесных дефектов в их структуре. Целью данной работы было установить дефектную структуру образцов ниобата лития двойного легирования катионами Zn и B, полученных методом комбинированного легирования [3]. Содержание примесей определялось методом атомно-эмиссионной спектроскопии (спектрометр ICPS-9000, Shimadzu) и составило  $C_{\text{Zn}} = 3.03, 3.49, 3.76, 3.91$  мол %,  $C_{\text{B}} \sim 10^{-4}$  мол %.

Образцы для исследования были предоставлены Лабораторией материалов электронной техники ИХТРЭМС КНЦ РАН (г. Апатиты). При выращивании использовался метод Чохральского. Рентгенограммы были получены на дифрактометре ДРОН-6 с использованием монохроматизированного  $\text{CuK}\alpha$ -излучения ( $\lambda = 1.54178\text{\AA}$ ). Уточнение координат атомов основного мотива, примесных атомов в структуре и антиструктурных дефектов (атомы ниобия в позиции лития или в пустом кислородном октаэдре) и их концентраций проводилось методом Ритвельда в программном комплексе MR1A [4]. Было установлено, что при двойном легировании объём элементарной ячейки ( $V$ ) исследуемых образцов выше, чем для кристалла стехиометрического состава ( $317.09\text{\AA}^3$  [5]), и увеличивается с повышением концентрации цинка  $C_{\text{Zn}}$  (рис. 1).

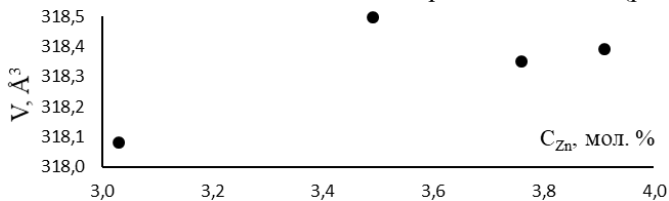


Рис. 1. Концентрационная зависимость объёма элементарной ячейки кристаллов  $\text{LiNbO}_3\text{:Zn:B}$

Во всех исследованных образцах Zn занимает как литиевые позиции, так и позиции пустого октаэдра, при этом Zn преимущественно располагается в позициях Li, вплоть до концентрации 3.76 мол. %. При концентрации 3.91 мол. % атомы Zn равномерно распределены между двух позиций. Суммарная концентрация ниобиевых дефектов лежит в пределах от 0.033 до 0.044. Литиевых вакансий не наблюдается, зарядовая компенсация происходит за счёт образования вакансий по ниобию.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-13-20004.

#### Список литературы

1. Сидоров Н.В., Волк Т.Р., Маврин Б.Н., Калинин В.Т. Ниобат лития: дефекты, фоторефракция, колебательный спектр. *Спектр-поляритоны*. М.: Наука, 2003.
2. Сидоров Н.В., Палатников М.Н., Теплякова Н.А., Бирюкова И.В., Титов Р.А., Макарова О.В., Маслобоева С.М. Монокристаллы ниобата и танталата лития разного состава и генезиса. М.: Из-во РАН, 2022.
3. Palatnikov M.N., Biryukova I.V., Titov R.A., Teplyakova N.A., Bobreva L.A., Efremov I.N., Palatnikova O.V., Sidorov N.V. // *Optical and Quantum Electronics*. 2025. V. 57. No. 9. P. 491.
4. Zlokazov V.B. // *J.Appl.Crystall.* 1992. V. 25. P. 447-451
5. Tokko O.V., Kadetova A.V., Prusskii A.I., Smirnov M.V., Palatnikov M.N., Sidorov N.V. // *Phys. Status Solidi A*. 2024. P. 2300796.

С.М. ШАНДАРОВ, М.Г. КИСТЕНЕВА, А.С. АКРЕСТИНА,  
А.А. КОЛМАКОВ, Р.И. АНИСИМОВ, Э.В. КОМОВ

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники*

## **АППРОКСИМАЦИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В КРИСТАЛЛАХ $\text{LiNbO}_3\text{:Cu}$**

В рамках модели дефектов, допускающих фотовозбуждение электронов в зону проводимости и внутрицентровые переходы, проведена аппроксимация спектральных зависимостей оптического поглощения в кристаллах  $\text{LiNbO}_3\text{:Cu}$  X-среза, полученных диффузионным легированием в атмосфере аргона при температурах от 600 до 800 °С.

S.M. SHANDAROV, M.G. KISTENEVA, A.S. AKRESTINA,  
A.A. KOLMAKOV, R.I. ANISIMOV, E.V. KOMOV

*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*

## **APPROXIMATION OF OPTICAL ABSORPTION SPECTRA IN $\text{LiNbO}_3\text{:Cu}$ CRYSTALS**

We approximated the optical absorption spectra in X-cut  $\text{LiNbO}_3\text{:Cu}$  crystals. We used a model of defects that allow electron photoexcitation into the conduction band and intracenter transitions. The  $\text{LiNbO}_3\text{:Cu}$  crystals were obtained by diffusion doping in an argon atmosphere at temperatures ranging from 600 to 800 °C.

Диффузионно-легированные кристаллы  $\text{LiNbO}_3\text{:Cu}$  могут быть основой для реализации устройств оптического управления ансамблями микро- и наночастиц [1], называемыми фотовольтаическими пинцетами [2]. При этом легирование медью приводит к появлению дефектов, которые оказывают влияние на спектры оптического поглощения ниобата лития [3]. В настоящем сообщении представлены результаты аппроксимации спектральных зависимостей оптического поглощения в пластинах  $\text{LiNbO}_3\text{:Cu}$  X-среза, легированных методом термодиффузии.

В экспериментах исследовались четыре пластины из ниобата лития X-среза с толщиной 2 мм, при этом пластина 1 оставалась нелегированной. Плёнки меди с толщиной 800 нм наносились на пластину 2 с двух сторон, а на 3 и 4 – с одной. Диффузия в пластины 2, 3, и 4 проводилась в атмосфере аргона в течение 12 часов при температурах 600, 750 и 800 °С соответственно. Спектральные зависимости показателей

поглощения пластин, показанные точками на рис. 1, рассчитывались из спектров их пропускания, регистрируемых на спектрофотометре СФ-56.

Экспериментальные спектральные зависимости оптического поглощения для кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$  были аппроксимированы в рамках модели, учитывающей вклад в примесное поглощение фотовозбуждения электронов в зону проводимости с глубоких донорных центров с нормальным законом распределения концентраций по энергии ионизации и внутрицентровых переходов [4]. Представленные на рис. 1 аппроксимирующие кривые учитывают два внутрицентровых перехода с гауссовской спектральной характеристикой с максимумами при энергиях квантов, равных  $\sim 1,25$  и  $\sim 3,01$  эВ, и четыре глубоких донорных центра со средними значениями энергии ионизации 0,96; 1,64; 2,33 и 3,39 эВ. Рост вклада внутрицентрового перехода с максимумом при энергии кванта  $\sim 1,25$  эВ, наблюдаемый с увеличением температуры диффузии от 600 до 800 °С, можно связать с увеличением концентрации ионов  $\text{Cu}^{2+}$ . Расчёты показывают, что с увеличением температуры диффузии имеет место значительное возрастание вклада внутрицентрового перехода с максимумом при энергии кванта  $\sim 3,01$  эВ и заполнения глубоких донорных центров с энергиями ионизации 2,33 и 3,39 эВ. Последнее может быть связано с соответствующим ростом концентрации дефектов в зарядовом состоянии  $\text{Cu}^+$ .

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки и высшего образования Российской Федерации в рамках Госзадания FEWM-2023-012 на 2023 – 2025 гг.

#### Список литературы

1. Мамбетова К.М. и др. // Известия вузов. Физика. 2019. Т. 62 (4). С. 83.
2. Villarroel J., et al. // Optics Express. 2011. V. 19 (24). P. 24320.
3. Peithmann K., Hukriede J., Buse K., Krätzig E. // Phys. Rev. 2000. V. 61 (7). P. 4615.
4. Kisteneva M.G., et.al. // Quantum Electronics. 2015. V. 45. P. 685.

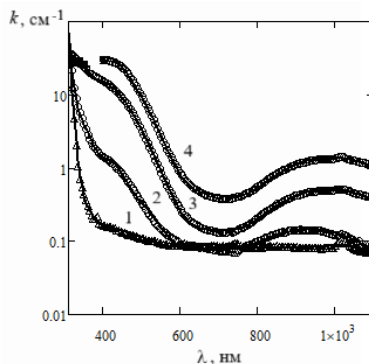


Рис. 1. Спектральные зависимости показателя поглощения в кристалле ниобата лития: 1 – чистый образец; 2, 3, и 4 – легированные медью при температурах 600, 750 и 800 °С, кружки – экспериментальные данные, сплошные линии – расчётные зависимости

С.М. КОСТРИЦКИЙ, В.А. ФЕДОРОВ,  
О.Г. СЕВОСТЬЯНОВ<sup>1</sup>, И.М. ЧИРКОВА<sup>1</sup>

*НПК Оптилинк, Зеленоград*

*<sup>1</sup>Кемеровский государственный университет*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ КАНАЛЬНЫХ ПРОТОНО-ОБМЕННЫХ ВОЛНОВОДОВ В КРИСТАЛЛАХ LiNbO<sub>3</sub>**

Разработана методика определения фазового состава канальных волноводов из данных конфокальной спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС). Установлено, что электрооптические свойства волноводов зависят от их фазового состава, который изменяется модификацией процесса изготовления. Полученные результаты позволили провести оптимизацию процесса изготовления интегрально-оптических модуляторов на основе данных спектроскопии КРС.

S.M. KOSTRITSKII, V.A. FEDOROV,  
O.G. SEVOSTYANOV<sup>1</sup>, I.M. CHIRKOVA<sup>1</sup>

*RPC Optolink Ltd, Zelenograd*

*<sup>1</sup>Kemerovo State University*

## **STUDY OF CHANNEL PROTON-EXCHANGED WAVEGUIDES IN LiNbO<sub>3</sub> CRYSTALS**

The new method for evaluation of a phase composition of waveguides was developed on basis of the confocal Raman spectroscopy. Electro-optical properties of the waveguides are found to be depending on their phase composition that was changed intentionally by variation of technological conditions. These experimental findings allowed for the optimization of technology for production of phase modulators based on channel waveguides in LiNbO<sub>3</sub> crystals.

Цель данного исследования заключается в определении параметров линий и полос в спектрах комбинационного рассеяния света (КРС) планарных протонно-обменных (ПО) волноводов, фазовый состав которых первоначально идентифицирован по данным ИК-спектроскопии и рентгеноструктурного анализа, что позволит, в дальнейшем, использовать метод спектроскопии КРС для определения фазового состава канальных ПО волноводов в ниобате лития. Отметим, что методы ИК-спектроскопии и рентгеноструктурного анализа, широко используемые для планарных волноводов [1, 2], не позволяют определить фазовый состав канальных оптических волноводов, из-за их малого размера (в нашем случае ширина

канала составляла от 5,8 до 6,6 мкм). Кроме того, применяя метод спектроскопии КРС, мы получаем преимущество в селективности изучения участков волноводов по их глубине, в отличие от метода ИК-спектроскопии отражения или, тем более, ИК-поглощения, в которых анализируемый сигнал представляет собой суперпозицию парциальных спектров различных приповерхностных областей, из-которых только небольшая часть подвергнута протонному обмену. Для решения этой задачи мы использовали конфокальную спектроскопию КРС, так как спектры КРС различных фаз  $H_xLi_{1-x}NbO_3$  существенно различаются [3], а использование конфокального микроскопа в микро-КРС спектрометре даёт высокое пространственное разрешение ( $\leq 1$  мкм), достаточное для детального исследования поперечного профиля канальных волноводов и интегрально-оптических схем на их основе.

Были измерены спектры микро-КРС для образцов планарных ПО-волноводов, фазовый состав и электро-оптические (ЭО) свойства которых были определены методами ИК- и УФ-спектроскопии [3,4]. Это позволило установить корреляции между параметрами спектров микро-КРС, фазовым составом и значениями ЭО-коэффициентов, что было использовано нами для оптимизации условий изготовления фазовых ЭО-модуляторов на основе канальных ПО-волноводов в кристаллах  $LiNbO_3$ .

Установлена явная эмпирическая корреляция между интенсивностью широкополосного низкочастотного КРС ( $\leq 120$  см<sup>-1</sup>) [3] и деградацией эффективного значения ЭО-коэффициента  $\gamma_{33}$ , что делает возможным проведение сравнительного анализа ЭО-эффективности волноводов, изготовленных в различных технологических условиях.

Для изготовления волноводов были использованы различные методы ПО [2 - 5]. Сравнительное изучение подтвердило эффективность «мягкого» ПО [5] при изготовлении канальных волноводов, наряду с ранее установленными преимуществами [5] при изготовлении планарных волноводов.

#### *Список литературы*

1. Kuneva M., Tonchev S. // Bulgarian Chemical Communications. 2011. V. 43. P. 276-287.
2. Kostritskii S.M., Rodnov S.V., Korkishko Yu.N., Fedorov V.A., Sevostyanov O.G. // Ferroelectrics. 2012. V. 440. P. 47-56.
3. Rambu A.P., Kostritskii S., Fedorov V., Sevostyanov O., Chirkova I., Tascu S. // Materials. 2024. V. 17. P. 2249.
4. Kostritskii S.M., Korkishko Yu.N., Fedorov V.A. // Proc. SPIE. 2013. V. 9065. P. 90650E.
5. Castaldini D, Bassi P, Tascu S, Aschieri P, De Micheli M.P, Baldi P. // J. Lightwave Technol. 2007. V. 25. P. 1588-1593.

А.С. АКРЕСТИНА, М.Г. КИСТЕНЕВА, Э.В. КОМОВ,  
А.Е. АПАСЬЕВА, Ч.Б. БУДУЕВА, А.Х. САЛЧАК, М. МИШЕЛЬ  
*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники*

**СВЯЗЬ СПЕКТРОВ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ  
С КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ИОНОВ  $\text{Cu}^+$  И  $\text{Cu}^{2+}$   
В ДИФфуЗИОННО-ЛЕГИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛАХ  
НИОБАТА ЛИТИЯ**

Исследованы спектральные зависимости оптического поглощения на длине волны 532 нм в кристаллах  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$  X-среза, полученных диффузионным легированием в атмосфере аргона при температурах 700, 750 и 800 °C. Определены коэффициенты, связывающие концентрации ионов  $\text{Cu}^+$  со значениями оптического поглощения на длине волны 532 нм как для неполяризованного некогерентного излучения, так и для обыкновенного и необыкновенного лазерных пучков.

A.S. AKRESTINA, M.G. KISTENEVA, E.V. KOMOV,  
A.E. APASEVA, Ch.B. BUDUEVA, A.H. SALCHAK, M. MICHEL  
*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*

**RELATIONSHIP BETWEEN OPTICAL ABSORPTION  
SPECTRA AND  $\text{Cu}^+$  AND  $\text{Cu}^{2+}$  IONS CONCENTRATION  
IN DIFFUSION-DOPED LITHIUM NIOBATE CRYSTALS**

The spectral dependences of optical absorption at a wavelength of 532 nm were studied in  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$  crystals of X-cut, obtained by diffusion doping in an argon atmosphere at temperatures of 700, 750, and 800 °C. The coefficients correlating the concentration of  $\text{Cu}^+$  ions with optical absorption at 532 nm have been determined for unpolarized incoherent radiation, as well as for ordinary and extraordinary polarized laser beams.

Легирование медью кристаллов ниобата лития приводит к появлению дефектов в виде ионов в зарядовых состояниях  $\text{Cu}^+$  и  $\text{Cu}^{2+}$ , которые изменяют его оптические и фотовольтаические свойства [1 - 3]. В настоящем сообщении представлены результаты экспериментальной оценки коэффициентов, связывающих оптическое поглощение на длине волны 532 нм в диффузионно-легированных кристаллах  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$  для некогерентного и для поляризованного лазерного излучения.



В экспериментах использовались оптически полированные пластины  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$  X-среза с толщиной 2 мм, созданных методом термодиффузии при температурах 700, 750 и 800 °C по технологии, описанной в работе [3]. Из спектров пропускания, регистрируемых на спектрофотометре СФ-56, были рассчитаны усреднённые по координате  $x$  значения показателей поглощения диффузионной структурой  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$  некогерентного излучения  $k_{477}^{\text{in}}$  и  $k_{532}^{\text{in}}$  на длинах волн 477 и 532 нм соответственно.

Показатели поглощения  $k_{477}^{\text{in}}$  с использованием известного соотношения [1] позволили определить значения  $C_{\text{Cu}^+}$  для усреднённых концентраций ионов  $\text{Cu}^+$ , приведённые во втором столбце табл. 1. В предположении линейной связи  $C_{\text{Cu}^+}$  и показателя поглощения  $k_{532}^{\text{in}}$ , из экспериментальных данных и соотношения  $C_{\text{Cu}^+}/k_{532}^{\text{in}} = m_{532}^{\text{in}}$  были вычислены соответствующие коэффициенты пропорциональности, приведённые в третьем столбце табл. 1. В четвёртом и пятом столбцах табл. 1 представлены результаты расчётов, из экспериментальных измерений пропускания образцов  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$  для обыкновенного (о) и необыкновенного (е) лазерных пучков с длиной волны 532 нм, коэффициентов  $m_{532}^{\text{o}}$  и  $m_{532}^{\text{e}}$ .

Таблица 1

| Температура диффузии | $C_{\text{Cu}^+}, 10^{23} \text{ м}^{-3}$ | $m_{532}^{\text{in}}, 10^{21} \text{ м}^{-2}$ | $m_{532}^{\text{o}}, 10^{21} \text{ м}^{-2}$ | $m_{532}^{\text{e}}, 10^{21} \text{ м}^{-2}$ |
|----------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 700 °C               | 8,23                                      | 8,00                                          | $5,96 \pm 0,05$                              | $10,29 \pm 0,13$                             |
| 750 °C               | 10,41                                     | 7,88                                          | $5,91 \pm 0,03$                              | $13,41 \pm 0,14$                             |
| 800 °C               | 30,06                                     | 7,25                                          | $6,25 \pm 0,49$                              | $12,58 \pm 0,38$                             |

Таким образом, из проведённых экспериментов следует, что разброс в определении концентрации  $C_{\text{Cu}^+}$  с использованием измеренных значений  $k_{532}^{\text{in}}$  не превышает 10 %. Обнаружено, что показатели поглощения для обыкновенного и необыкновенного лазерных пучков,  $k_{532}^{\text{o}}$  и  $k_{532}^{\text{e}}$ , в диффузионных структурах  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$  заметно различаются.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки и высшего образования Российской Федерации в рамках Госзадания FEWM-2023-012 на 2023 – 2025 гг.

#### Список литературы

1. Peithmann K., Hukriede J., Buse K, Krätzig E. // Phys. Rev. 2000. V. 61 (7). P. 4615.
2. Мамбетова К.М. и др. // Известия вузов. Радиофизика. 2014. Т. 57. № 8-9. С. 675.
3. Колмаков А.А. и др.// Оптический журнал. 2025. Т. 92. № 7. С. 26.

М.В. СМІРНОВ<sup>1</sup>, Н.В. СІДОРОВ<sup>1</sup>, М.Н. ПАЛАТНИКОВ<sup>1</sup>,  
А.В. КАДЕТОВА<sup>1,2</sup>, О.В. ТОККО<sup>2</sup>, О.В. ПАЛАТНИКОВА<sup>1</sup>,  
А.Ю. ПЯТЫШЕВ<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>*Петрозаводский государственный университет*

<sup>3</sup>*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

## **СТРУКТУРА, ДЕФЕКТЫ, ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА И ОСОБЕННОСТИ РОСТА Er ЛЕГИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛОВ НИОБАТА ЛИТИЯ**

Показаны отличительные особенности структуры, точечных и комплексных дефектов, люминесцентных свойств и особенностей роста кристаллов LiNbO<sub>3</sub>:Er (0.16 - 3.1 мас. %) с помощью рентгеноструктурного анализа, ИК-спектроскопии, оптической спектроскопии и люминесцентного анализа.

M.V. SMIRNOV<sup>1</sup>, N.V. SIDOROV<sup>1</sup>, M.N. PALATNIKOV<sup>1</sup>,  
A.V. KADETOVA<sup>1,2</sup>, O.V. TOKKO<sup>2</sup>, O.V. PALATNIKOVA<sup>1</sup>,  
V.Yu. PYATYSHEV<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>*Petrozavodsk State University*

<sup>3</sup>*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

## **STRUCTURE, DEFECTS, LUMINESCENT PROPERTIES AND GROWTH FEATURES OF Er-DOPED LITHIUM NIOBATE SINGLE CRYSTALS**

The difference of the structure, point and complex defects, luminescent properties and growth features of LiNbO<sub>3</sub>:Er (0.16 - 3.1 wt %) crystals were shown by X-ray diffraction analysis, IR spectroscopy, optical spectroscopy and luminescence analysis.

Кристаллы ниобата лития (LN), легированные Er, перспективны для разработки функциональных материалов для оптоэлектроники и лазерной техники. Сочетание нелинейно-оптических свойств LN и лазерных характеристик иона Er<sup>3+</sup> играет ключевую роль в формировании принципиально новых и модифицировании уже имеющихся оптических свойств материала на основе кристаллов LN:Er [1]. В зависимости от концентрации Er в кристалле изменяется его дефектная структура, стехиометрия, поляризация кислородных октаэдров, что актуально для

получения материала с заданными физическими свойствами. Цель данной работы заключается в исследовании влияния концентрации Ег на структуру, дефекты, люминесцентные свойства и особенности роста кристаллов LN:Ег (0.16 - 3.1 мас. %).

Все кристаллы были выращены методом Чохральского. Легирующий оксид ( $\text{Ег}_2\text{О}_3$ ) вводился в шихту LN конгруэнтного состава ( $\text{Li/Nb} = 0.946$ ) перед наплавлением тигля. ИК-спектры кристаллов были получены в вакууме на спектрометре IFS 66 v/s, регистрация рентгенограмм проводилась на дифрактометре ДРОН-6 ( $\lambda_{\text{CuK}\alpha} = 1.54178 \text{ \AA}$ ) в интервале углов от 5 до 145°, уточнение структурных характеристик проводилось методом Ритвельда. Исследование люминесцентных свойств проводили на спектрофлуориметре FL970 ( $\lambda = 200 - 900 \text{ нм}$ ). Макро- и микродефектная структура исследуемых образцов исследовалась на оптическом микроскопе Zeiss Axio Observer.

ИК-спектры в области поглощения ОН-групп показали, что увеличение концентрации Ег (0.16 - 3.1 мас. %) приводит к «красному» смещению спектра за счёт увеличения квазиупругой постоянной связи О-Н, и к его трансформации в широкую монополосу. Последние говорит о высокой степени структурного совершенства кристалла LN:Ег (3.1 мас. %). Согласно рентгеноструктурному анализу Ег локализуется в позиции лития ( $\text{Ег}_{\text{Li}}$ ) и в пустом кислородном октаэдре ( $\text{Ег}_{\text{Okt}}$ ). В кристалле LN:Ег (2.8 мас. %) отсутствуют дефекты  $\text{Nb}_{\text{Li}}$ . Дефекты  $\text{Ег}_{\text{Li}}$  смещаются в центр литиевого октаэдра с ростом концентрации Ег в LN:Ег (2.8 - 3.1 мас. %), и форма октаэдров  $\text{LiO}_6$  и  $\text{Ег}_{\text{Li}}\text{O}_6$  стремиться к правильной. В спектре люминесценции кристалла LN:Ег (3.1 мас. %) часть полос излучения переходов  ${}^2\text{H}_{11/2}$  и  ${}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$  иона  $\text{Ег}^{3+}$  «исчезает» относительно таковых для LN:Ег (0.97 мас. %). Смещение ионов  $\text{Ег}^{3+}$  в более симметричное положение вероятно изменяет положение штарковских подуровней энергии.

Оптическая спектроскопия показала, что строго концентрический характер полос роста для кристалла LN:Ег (1.0 мас. %) заменяется размытыми асимметричными кругами для LN:Ег (2.0 мас. %), а замкнутый характер полос роста для LN:Ег (2.8 мас. %) исчезает, их количество уменьшается. В LN:Ег (3.1 мас. %) отсутствуют полосы роста и зарегистрированы микродомены правильной гексагональной формы, что указывает на равновесный характер процесса кристаллизации кристалла.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 24-13-20004.

*Список литературы*

1. Xing L., et al. // Optical Materials. 2018. V. 84. P. 215-220.

М.Ф. УМАРОВ, А.К. КАЮМЗОДА<sup>1</sup>

*Вологодский государственный университет*

<sup>1</sup>*Худжандский государственный университет им. акад. Б. Гафурова,  
Таджикистан*

## **МЯГКАЯ МОДА В ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ КРИСТАЛЛЕ $\text{Pr}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$**

Исследование температурной зависимости диэлектрической проницаемости выявило фазовый переход второго рода в кристаллах  $\text{Pr}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$ , обусловленный изменением их структуры. В деформированном состоянии данного вещества отчётливо наблюдается мягкий режим колебаний решётки.

M.F. UMAROV, A.K. KAYUMZODA<sup>1</sup>

*<sup>1</sup>Vologda State University*

<sup>2</sup>*Khujand State University named after Academician Babajan Gafurov, Tajikistan*

## **SOFT FASHION IN PIEZOELECTRIC CRYSTAL $\text{Pr}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$**

Analysis of the effect of temperature on the dielectric constant showed that  $\text{Pr}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$  crystals have a second-order phase transition associated with a structure shift. In the deformed phase of this material, a soft mode of lattice vibrations has been clearly identified.

Широкое применение пьезоэлектрических материалов в различных технологиях, включая датчики и устройства генерации электроэнергии, обусловлено способностью к преобразованию механической энергии в электрическую и наоборот. Кристалл  $\text{Pr}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$  привлекает внимание ученых как многообещающий материал с отличными свойствами и возможностью применения в инженерных разработках.

Предлагается исследование известных данных по пьезоэлектрическим характеристикам  $\text{Pr}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$ , дополненное экспериментальной проверкой изменений мягкой моды под воздействием температуры посредством метода комбинационного рассеяния света (КРС).

Для получения спектров КРС использовался гелий-неоновый лазер с длиной волны 632.8 нм и мощностью 100 мВт в качестве источника возбуждения. Спектры, снятые по схеме «геометрия 90 °», охватывали диапазон волновых чисел от 20 до 1200 см<sup>-1</sup> и регистрировались автоматическим спектрометром ДФС-24. Поддержание необходимой температуры в пределах 300 - 1200 К для проведения измерений при

повышенных температурах осуществлялось с помощью специального высокотемпературного термостата.

Повышение температуры приводит к тому, что интенсивность максимума в области низких частот ( $\nu = 114 \text{ см}^{-1}$  при  $T = 300 \text{ K}$ ) заметно изменяет своё положение, приближаясь к крылу Рэля, тогда как интенсивность основного колебания демонстрирует тенденцию к снижению. Кроме того, частота обсуждаемого максимума уменьшается от  $114$  до  $30 \text{ см}^{-1}$  ( $T = 710 \text{ K}$ ) (рис. 1). При температурах выше  $720 \text{ K}$  этот максимум полностью исчезает.

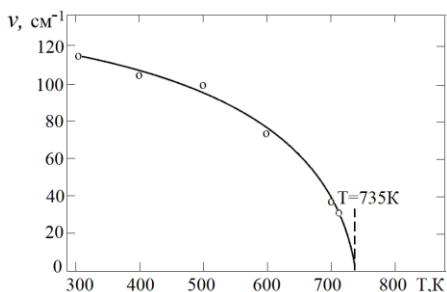


Рис. 1. Температурная зависимость низкочастотного максимума ( $\nu = 114 \text{ см}^{-1}$  при  $T = 300 \text{ K}$ ) в кристалле  $\text{Pr}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$

Как видно из рис. 1, наблюдается плавное уменьшение низкочастотного максимума по мере повышения температуры кристалла  $\text{Pr}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$ , и частота колебаний стремится к нулю, когда температура образца достигает температуры структурного фазового перехода ( $T_c = 735 \text{ K}$ ). Продолжая анализ данной взаимосвязи, мы получаем важную температуру –  $735 \text{ K}$ , что созвучно ранее зафиксированной [1] температуре максимальной диэлектрической проницаемости и указывает на переход второго порядка.

Таким образом, изучение влияния температуры на низкочастотную часть спектров рассеяния рентгеновских лучей в кристалле  $\text{Pr}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$  выявило наличие фазовых переходов второго рода типа смещения, сопровождающихся чётко выраженным появлением мягкого режима колебаний решётки в деформированной фазе.

#### Список литературы

1. Hojibaev A.K., Oreshonkov A.S., Vtyurin A.N., Umarov M.F. Raman spectra and structural phase transition in  $\text{Pr}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$  crystal // *Ferroelectrics*. 2015. V. 486. No. 1. P. 86-90.

А.П. ДУДКА, Т.Г. ГОЛОВИНА, А.Ф. КОНСТАНТИНОВА,  
А.В. БУТАШИН, В.М. КАСИМОВА<sup>1</sup>, Н.С. КОЗЛОВА<sup>1</sup>,  
Е.В. ЗАБЕЛИНА<sup>1</sup>

*Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова*

*НИИ «Курчатовский институт», Москва*

*<sup>1</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,  
Москва*

## **ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СТРУКТУРЫ И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КРИСТАЛЛОВ СЕМЕЙСТВА ЛАНГАСИТА ( $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x$ )<sub>3</sub>Ta<sub>0.5</sub>Ga<sub>5.5</sub>O<sub>14</sub>**

Для кристаллов-лангаситов ( $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x$ )<sub>3</sub>Ta<sub>0.5</sub>Ga<sub>5.5</sub>O<sub>14</sub> проведено исследование температурной зависимости структуры и оптических свойств. Найдено, что температурная эволюция оптической активности кристаллов коррелирует с аномальным изменением межатомных расстояний в октаэдре [Ta,Ga]O<sub>6</sub>.

A.P. DUDKA, T.G. GOLOVINA, A.F. KONSTANTINOVA,  
A.V. BUTASHIN, V.M. KASIMOVA<sup>1</sup>, N.S. KOZLOVA<sup>1</sup>,  
E.V. ZABELINA<sup>1</sup>

*Shubnikov Institute of Crystallography of NRC «Kurchatov Institute», Moscow*

*<sup>1</sup>National University of Science and Technology MISIS, Moscow*

## **TEMPERATURE DEPENDENCE OF STRUCTURE AND OPTICAL PROPERTIES OF THE LANGASITE FAMILY CRYSTALS ( $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x$ )<sub>3</sub>Ta<sub>0.5</sub>Ga<sub>5.5</sub>O<sub>14</sub>**

The temperature dependence of the structure and optical properties of langasite family crystals ( $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x$ )<sub>3</sub>Ta<sub>0.5</sub>Ga<sub>5.5</sub>O<sub>14</sub> has been studied. It has been found that the temperature evolution of the optical activity of crystals correlates with an anomalous change in the interatomic distances in the [Ta,Ga]O<sub>6</sub> octahedron.

Для кристалла ( $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x$ )<sub>3</sub>Ta<sub>0.5</sub>Ga<sub>5.5</sub>O<sub>14</sub> семейства лангасита [1], выращенного методом Чохральского, на образце z-среза проведено измерение на спектрофотометре Cary-5000 с приставкой UMA спектров пропускания и поглощения, рассчитано вращение плоскости поляризации света  $\rho_z$  (рис. 1). Величины  $\rho_z$  в области прозрачности практически соответствуют значениям  $\rho_z$  для  $\text{La}_3\text{Ta}_{0.5}\text{Ga}_{5.5}\text{O}_{14}$  (пунктир). Изменения  $\rho_z$  и показателя преломления  $n_o$  (врезка на рис. 1) в области полос поглощения рассчитаны с помощью соотношений Крамерса–Кронига.

Проведена серия из 16 экспериментов на дифрактометре XtaLAB Synergy DW (Rigaku Oxford Diffraction), на  $\text{MoK}_\alpha$ -излучении с детектором HyPix-Arc 150 при 85 - 450 К. Формула кристалла установлена как  $(\text{La}_{0.862(8)}\text{Nd}_{0.138(8)})_3\text{Ta}_{0.483(4)}\text{Ga}_{5.517}\text{O}_{14}$ . На врезке рис. 2 приведено изменение с температурой межатомного расстояния в октаэдре  $[\text{Ta,Ga}]\text{O}_6$ , находящемся на оси  $c$  элементарной ячейки, который демонстрирует аномальное расширение ниже 200 К. Спирали электронной плотности вокруг оси  $c$  ячейки определяют оптическую активность лангаситов [2].

По структурным данным проведён расчёт методом молекулярных рефракций [3] и по программе WinOptAct температурных зависимостей показателей преломления  $n_o$ ,  $n_e$  и коэффициентов вращения плоскости поляризации света при его распространении в направлении параллельно ( $\rho_z$ ) и перпендикулярно ( $\rho_x$ ) [4] к главной оптической оси (привидены на рис. 2) в области прозрачности при  $\lambda = 633$  нм. При 295 К получено  $n_o = 1.9300$ ,  $n_e = 1.9561$ ,  $\rho_z = -15.5$ ,  $\rho_x = 27.2$  град/мм. Результаты расчёта  $\rho_z$  согласуются с измеренными значениями. Изменение коэффициентов  $\rho_z$  и  $\rho_x$  «следует» за изменением межатомного расстояния  $d(\text{TaGa-O36g})$  с некоторой «задержкой» по температуре, вызванной релаксацией из-за рыхлости структуры лангаситов. Такое подобное поведение структуры и свойств, включающее как аномальное возрастание значений, так и противоположное уменьшение их в низкотемпературной области ниже 100 К, доказывает их причинно-следственную связь.

Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» и при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания ВУЗам FSME-2023-0003.

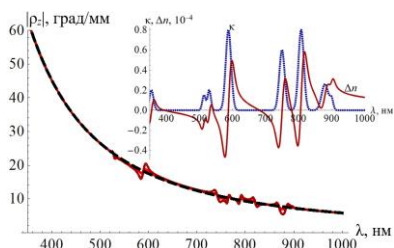


Рис. 1. Зависимость  $\rho_z(\lambda)$ ; изменение  $n_o$  в полосах поглощения  $\kappa$

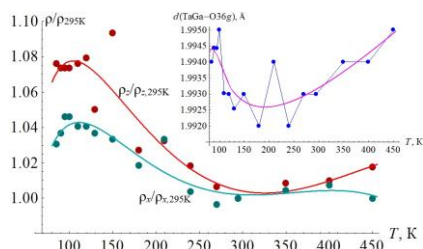


Рис. 2. Температурные зависимости  $\rho_z$ ,  $\rho_x$  и межатомного расстояния  $d(\text{TaGa-O36g})$

#### Список литературы

1. Милль Б.В., Буташии А.В., Ходжабаган Г.Г. и др. // ДАН СССР. 1982. Т. 264. С. 1385.
2. Дудка А.П. Милль Б.В. // Кристаллография. 2013. Т. 58. № 4. С. 593.
3. Бацанов С.С. Структурная рефрактометрия. М.: Высшая школа. 1976.
4. Константинова А.Ф. и др. Оптические свойства кристаллов. Минск, 1995.

М.Ф. УМАРОВ, А.М. МАХМУДЗОДА<sup>1</sup>

*Вологодский государственный университет*

<sup>1</sup>*Худжандский государственный университет им. акад. Б. Гафурова,  
Таджикистан*

## **СУПЕРЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ ПРЕПАРАТАХ**

Проведена оценка спектра фотолюминесценции трёх фармацевтических препаратов – цитрамона, парацетамола и анальгина. Исследования проводились как в твердотельной фазе, так и в водных растворах, с использованием волоконно-оптического метода. В ходе экспериментов было обнаружено явное проявление суперлюминесценции в водных растворах всех изучаемых препаратов. Также установлено, что при добавлении нанопорошка  $Al_2O_3$  в водных растворах интенсивность возрастает, а вид спектра становится более чётким.

M.F. UMAROV, A.M. MAKHMUDZODA<sup>1</sup>

*<sup>1</sup>Vologda State University*

<sup>2</sup>*Khujand State University named after Academician Babajan Gafurov, Tajikistan*

## **SUPERLUMINESCENCE IN PHARMACEUTICAL PREPARATIONS**

The photoluminescence spectrum of three pharmaceuticals – Citramon, Paracetamol and Analgin was evaluated. The studies were carried out both in the solid phase and in aqueous solutions, using the fiber-optic method. During the experiments, a clear manifestation of superluminescence in aqueous solutions of all the studied drugs was found. It has also been found that when  $Al_2O_3$  nanopowder is added to aqueous solutions, the intensity increases and the spectrum becomes clearer.

Использование оптоволоконных технологий для изучения флуоресцентных свойств биологически активных соединений представляется перспективным и универсальным подходом. Для детального рассмотрения в роли исследуемых объектов были отобраны широко распространённые фармацевтические препараты – цитрамон, анальгин и парацетамол.

Установлено, что из сравнения спектров фотолюминесценции изучаемых препаратов при переходе от твердотельных образцов к насыщенным водным растворам происходит резкое возрастание интенсивности фотолюминесценции в коротковолновой области спектра и её спадание в фиолетово-синей области. В частности, в спектре анальгина



зафиксировано суперлюминесцентное излучение с пиком при 650 нм и дополнительная линия в синем цвете (457 нм). Обнаружено, что интенсивность данного излучения возрастает при добавлении нанопорошка  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в водных растворах возрастает, а вид спектра становится более чётким [1].

Изменение распределения энергии в спектрах вторичного свечения изучаемых ароматических веществ связано с переходом от самопроизвольного проявления фотолюминесценции к суперлюминесценции. Этот процесс вызван высокой степенью заполнения энергетического уровня возбуждённого синглета ароматической молекулы под воздействием мощного короткого ультрафиолетового лазерного импульса. Природа усиления в этом случае аналогична известному механизму в лазерах на красителях [2]. Определить величину коэффициента усиления можно так:

$$K = \sigma \cdot (N_{s1} - N_{s0}) \approx \sigma \cdot N_{s1} \quad (1)$$

При условии, что величина эффективного сечения  $\sigma \sim 10^{-16} \text{ см}^2$ , а концентрация молекул в водном растворе  $N_{s1} \sim 10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , получаем, что коэффициент усиления  $K \sim 10 - 100 \text{ см}^{-1}$ . При заданных значениях эффективного сечения поглощения и концентрации молекул в водном растворе, можно вычислить коэффициент усиления. Согласно с законом Буггера для активных сред ( $L \sim 0,1 \div 1 \text{ мм}$ ) имеем:

$$I(L) = I_0 \cdot e^{K \cdot L} \sim (10^2 \div 10^3) \cdot I_0. \quad (2)$$

Полученные расчёты позволяют объяснить форму спектров фотолюминесценции как в тонкоплёночных материалах, так и в водных растворах исследуемых соединений.

Замечено, что явление проявляется в виде суперлюминесценции в УФ-диапазоне, совпадающем с энергией самого низкого возбуждённого синглетного состояния электронов в анализируемых ароматических молекулах. Этот наблюдаемый эффект суперлюминесценции открывает интересные перспективы для создания новых типов лазеров. В частности, такие лазеры могут обладать перестраиваемой частотой генерации в ультрафиолетовой области спектра.

#### *Список литературы*

1. Горелик В.С., Литвинова А.О., Умаров М.Ф. Волоконно-оптическая регистрация спектров вторичного излучения молекулярных соединений // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2014. Т. 41. № 11. С. 3-9.
2. Войнов Ю.П., Горелик В.С., Пяташев А.Ю., Умаров М.Ф. Фотолюминесценция ароматических соединений, находящихся в фотонных ловушках, при резонансном импульсно-периодическом возбуждении // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2012. Т. 39. № 12. С. 28-36.

В.В. ДАВЫДОВСКАЯ, В.Н. НАВНЫКО, Д.С. БЛОЦКАЯ,  
А.В. ФЕДОРОВА, С.Н. ЗАВАЛЕЙ

*Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина,  
Беларусь*

**УСЛОВИЯ НАБЛЮДЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО  
ЭНЕРГООБМЕНА МЕЖДУ СИНФАЗНЫМИ ДВУМЕРНЫМИ  
СВЕТОВЫМИ ПУЧКАМИ В ФОТОРЕФРАКЦИОННОМ  
КРИСТАЛЛЕ КЛАССА СИММЕТРИИ 4 мм**

Определены оптимальные условия взаимодействия пучков: их геометрия ввода и параметры внешнего электрического поля, обеспечивающие максимальный энергообмен.

V.V. DAVYDOUSKAYA, V.N. NAUNYKA, D.S. BLOTSKAYA,  
A.V. FEDOROVA, S.N. ZAVALEI

*Mozyr State Pedagogical University named after I.P. Shamyakin, Belarus*

**CONDITIONS FOR OBSERVING EFFECTIVE ENERGY  
EXCHANGE BETWEEN IN-PHASE TWO-DIMENSIONAL  
LIGHT BEAMS IN A PHOTOREFRACTIVE CRYSTAL  
OF 4 mm SYMMETRY CLASS**

Optimal beam interaction conditions have been determined: their input geometry and external electric field parameters that ensure maximum energy exchange.

Практическая значимость фоторефрактивного эффекта во многом обусловлена явлением энергообмена между пучками, взаимодействующими в кристалле. Данное явление открывает возможности для управления и усиления оптического излучения одного пучка посредством другого [1, 2].

Рассмотрим взаимодействие двух пучков, вводимых в кристалл SBN параллельно направлению внешнего электрического поля (рис. 1). Для количественной оценки энергообмена вводится отношение интенсивностей верхнего ( $I_1$ ) и нижнего ( $I_2$ ) пучков –  $I_1 / I_2$ .

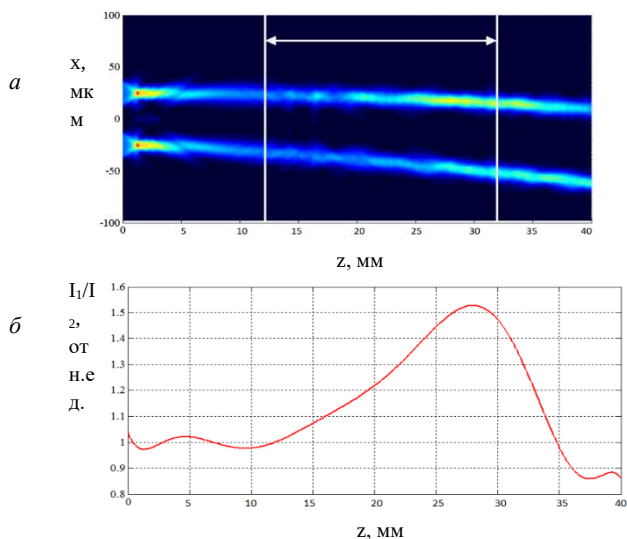


Рис. 1. Взаимодействие пучков при  $E_0 = 3$  кВ/см и толщине кристалла  $z = 40$  мм: распределение светового поля двумерных пучков по толщине кристалла (а); отношение интенсивностей верхнего и нижнего пучков (б)

Из рис. 1а видно, что интервал от 15 до 33 мм является оптимальным для достижения существенного энергообмена между пучками при  $E_0 = 3$  кВ/см. На всём протяжении этого участка значение отношения  $I_1 / I_2$  превышает 1.1, что и демонстрирует рис. 1б.

Все полученные теоретические результаты могут быть использованы для определения оптимальных параметров для реализации энергообмена между пучками, что, может найти применение при проектировании оптических волноводных устройств для канализации световых потоков, передачи и обработки информации.

Работа выполнена в рамках ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций» на 2021 - 2025 гг. (задание 6.1.14).

#### *Список литературы*

1. Shandarov S.M., et al. Denisyuk's dynamic holograms in cubic photorefractive crystals // Quantum Electronics. 2008. V. 38. No. 11. P. 1059-1069.
2. Kolegov A.A., et al. Dynamic reflection holograms for adaptive interferometry // Izv. universities Physics. 2010. No. 9/3. P. 147-148.

И.И. БУЧИНСКАЯ, Д.Н. КАРИМОВ, Н.И. СОРОКИН

*Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова*

*НИИЦ «Курчатовский институт», Москва*

## **КОНГРУЭНТНО-ПЛАВЯЩИЕСЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫЕ МОНОКРИСТАЛЛЫ ФТОРИДНЫХ ТВЁРДЫХ РАСТВОРОВ СО СТРУКТУРОЙ ФЛЮОРИТА КАК ОПТИЧЕСКИЕ СРЕДЫ**

Методом структурной рефрактометрии рассчитаны показатели преломления  $n_D$  (при  $\lambda = 0.589$  мкм) для 63 конгруэнтноплавящихся (однородных) монокристаллов двух-, трёх- и четырёхкомпонентных твёрдых растворов на основе  $MF_2$  ( $M = Ca, Sr, Ba, Cd, Pb$ ) и  $RF_3$  ( $R - RЗЭ$ ). Проведено сравнение результатов расчёта с экспериментом. Интервал изменения  $n_D$  составляет 1.44 - 1.75, величина  $n_D$  определяется химическим составом твёрдого раствора. Многокомпонентные фторидные монокристаллические среды, обладающие конгруэнтным плавлением, являются перспективными функциональными оптическими материалами (призмы, линзы, окна) от вакуумного УФ- до среднего ИК-диапазонов.

I.I. BUCHINSKAYA, D.N. KARIMOV, N.I. SOROKIN

*Shubnikov Institute of Crystallography of NRC «Kurchatov Institute», Moscow*

## **CONGRUENTLY MELTING MULTICOMPONENT SINGLE CRYSTALS OF FLUORIDE SOLID SOLUTIONS WITH FLUORITE STRUCTURE AS OPTICAL MEDIA**

The refractive indices  $n_D$  (at  $\lambda = 0.589$   $\mu m$ ) were calculated using structural refractometry for 63 congruently melting (homogeneous) single crystals of two-, three-, and four-component solid solutions based on  $MF_2$  ( $M = Ca, Sr, Ba, Cd, Pb$ ) and  $RF_3$  ( $R$  – rare earth elements). The calculated results were compared with experiment. The  $n_D$  variation range is 1.44 - 1.75, and the  $n_D$  value is determined by the chemical composition of the solid solution. Multicomponent fluoride single-crystal media with congruent melting are promising functional optical materials (prisms, lenses, windows) from the vacuum UV to mid-IR wavelength ranges.

Одними из основных продуктов высокотемпературного взаимодействия дифторидов  $Ca, Sr, Ba, Cd$  и  $Pb$  с трифторидами  $RЗЭ$  являются нестехиометрические фазы со структурой флюорита, представляющие практический интерес. В исследованиях, проведённых в Институте кристаллографии (Москва) [1 - 5] показана применимость метода структурной рефрактометрии [6] к расчёту показателей преломления двухкомпонентных монокристаллов фторидных твёрдых

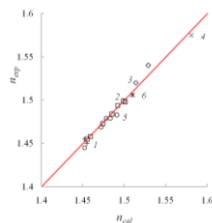
растворов со структурами флюорита и тисонита для оценки возможности их использования в качестве оптических сред и выбора оптического материала до выращивания монокристаллов. Однако однородные монокристаллы твёрдых растворов пригодные для практического применения не обладают ячеистой структурой только вблизи составов, отвечающих конгруэнтному плавлению [7, 8]. В продолжении этих исследований методом структурной рефрактометрии рассчитаны показатели преломления при  $\lambda = 0.589$  мкм для 63 конгруэнтноплавящихся однородных монокристаллов двух-, трёх- и четырёхкомпонентных твёрдых растворов со структурой флюорита в системах  $\text{CaF}_2\text{--RF}_3$ ,  $\text{SrF}_2\text{--RF}_3$ ,  $\text{BaF}_2\text{--RF}_3$ ,  $\text{CdF}_2\text{--RF}_3$ ,  $\text{PbF}_2\text{--RF}_3$ ,  $\text{CaF}_2\text{--SrF}_2\text{--RF}_3$ ,  $\text{SrF}_2\text{--BaF}_2\text{--RF}_3$ ,  $\text{PbF}_2\text{--CdF}_2\text{--RF}_3$  и  $\text{CaF}_2\text{--SrF}_2\text{--BaF}_2\text{--La(Nd)F}_3$  ( $R - \text{PЗЭ}$ ).

На рис. 1 приведено сравнение рассчитанных ( $n_{\text{cal}}$ ) и имеющихся в литературе экспериментальных ( $n_{\text{exp}}$ ) значений показателей преломления для некоторых многокомпонентных флюоритовых кристаллов. Можно видеть, что отклонение величин  $n_{\text{cal}}$  от  $n_{\text{exp}}$  не превышает 1 %.

Многокомпонентные монокристаллы флюоритовых твёрдых растворов с конгруэнтным плавлением можно отнести к перспективным конструкционным оптическим материалам от вакуумного УФ- до среднего ИК-диапазонов, которые существенно расширяют ассортимент промышленно производимых фторидных кристаллов  $\text{CaF}_2$  и  $\text{BaF}_2$ .

Работа проведена в рамках выполнения работ по Государственному заданию НИЦ «Курчатовский институт».

Рис. 1. Сравнение рассчитанных ( $n_{\text{cal}}$ ) и экспериментальных ( $n_{\text{exp}}$  [4, 8, 9]) значений показателей преломления для конгруэнтноплавящихся кристаллов



#### Список литературы

1. Федоров П.П. и др. // Тез. докл. 9 Всесоюз. симп. по химии неорган. фтор. 1990. С. 333.
2. Глушкова Т.М., Киселев Д.Ф. и др. // Оптический журнал. 1997. Т. 64 (3). С. 31.
3. Константинова А.Ф., Глушкова Т.М. и др. // Кристаллография. 2009. Т. 54 (4). С. 648.
4. Глушкова Т.М., Каримов Д.И. и др. // Кристаллография. 2009. Т. 54 (4). С. 642.
5. Константинова А.Ф. и др. // Кристаллография. 2010. Т. 55 (6). С. 1050.
6. Бацанов С.С. Структурная рефрактометрия. М.: Высшая школа. 1976.
7. Buchinskaya I.I., Fedorov P.P. // Crystallogr. Rep. 2024. V. 69 (2). P. 270.
8. Федоров П.П., Бучинская И.И. // Успехи химии. 2012. Т. 81 (1). С. 1.
9. Sobolev B.P. The Rare Earth Trifluorides. Barcelona: Institut d'Estudis Catalans, 2001.

К.А. УСТИНОВ, В.К. ДОНСКИХ<sup>1</sup>, Е.А. БОБЫЛЕВА<sup>1</sup>

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

*<sup>1</sup>Российский университет дружбы народов им. П. Лумумбы, Москва*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКИХ ПЛАНАРНЫХ ВОЛНОВОДОВ НА ОСНОВЕ НИТРИДА КРЕМНИЯ**

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния поверхностных дефектов на характеристики оптических планарных волноводов на основе нитрида кремния. Определена зависимость оптических потерь при распространении от линейного размера дефекта на поверхности волновода.

K.A. USTINOV, V.K. DONSKIH<sup>1</sup>, E.A. BOBYLEVA<sup>1</sup>

*Lomonosov Moscow State University*

*<sup>1</sup>Patrice Lumumba Peoples Friendship University of Russia, Moscow*

## **STUDY OF THE INFLUENCE OF SURFACE DEFECTS ON THE CHARACTERISTICS OF OPTICAL PLANAR WAVEGUIDES BASED ON SILICON NITRIDE**

The results of experimental investigations of the influence of surface defects on the characteristics of silicon nitride-based planar optical waveguides are presented. The dependence of optical losses during propagation on the linear size of the defect on the waveguide surface has been determined.

В настоящее время нитрид кремния является одним из ключевых материалов для создания интегрально-оптических компонентов благодаря его низким потерям, широкому окну прозрачности и совместимости с технологией CMOS [1]. Однако в технологических процессах его осаждения, в частности методом плазменно-химического осаждения из газовой фазы (PECVD), возможно возникновение пространственных неоднородностей, влияющих на стабильность параметров распространения излучения [2].

В данной работе представлены результаты исследования волноводных структур, выполненных на буферном слое диоксида кремния толщиной 4 мкм, полученном методом термического оксидирования. Волноводный слой из нитрида кремния осаждался методом PECVD до толщины 600 нм.

Структуры формировались при различных параметрах осаждения, варьируемых с целью моделирования технологических отклонений.

Морфология поверхности нитрида кремния исследовалась с использованием бесконтактного оптического профилометра, с помощью которого регистрировался профиль поверхности с субмикронным разрешением. Для количественного анализа коррелированных флуктуаций высоты применялся метод вариации Аллана, позволяющий оценить степень пространственной неоднородности и характер неровностей на различных масштабах.

Характеристики волноводов оценивались путём измерения оптических потерь при распространении излучения. Установлено, что оптические потери возрастают по мере удаления образца от центральной области пластины, что связано с изменением условий PECVD-осаждения. Волноводы, расположенные ближе к центру, демонстрируют потери 2,5...4,5 дБ/см и характеризуются максимальными значениями вариации Аллана менее 0.1 мкм. В то время как структуры, сформированные в периферийной области пластины, имеют более крупномасштабные флуктуации профиля до 1,3 мкм. что сопровождается ростом потерь до 6...7,5 дБ/см. Выявленная зависимость между амплитудой и пространственным масштабом морфологических флуктуаций и уровнем затухания подтверждает, что основной вклад в потери при распространении вносит рассеяние моды на коррелированных неровностях поверхности волновода.

Полученные результаты подтверждают применимость метода вариации Аллана для описания морфологических неоднородностей в нитрид-кремниевых волноводных структурах. Тем самым демонстрируется необходимость строгого контроля параметров PECVD-осаждения для повышения стабильности эксплуатационных характеристик интегрально-фотонных компонентов.

#### *Список литературы*

1. Косолобов С.С. и др. Кремниевая интегральная фотоника //Успехи физических наук. 2024. Т. 194. № 11. С. 1223-1239.
2. Никитин А.А. и др. Исследование технологии осаждения пленок нитрида кремния для применения в фотонных интегральных схемах // Фотоника. 2022. Т. 16. № 4. С. 296-305.
3. Ершов А.А. и др. Влияние отжига на волноведущие свойства планарных волноводов, изготовленных на основе пленок из нитрида кремния различной толщины // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27. № 2. С. 119-131.
4. Горелов Д.В. и др. Исследование технологического метода предотвращения растрескивания толстых слоев Si. N, при изготовлении ФИС // Труды МФТИ - 2025. Т. 17. № 3. С. 146-158.

О.В. КОЧЕРГИНА, А.О. ЗЕНЕВИЧ, Н.И. МУХУРОВ<sup>1</sup>

*Белорусская государственная академия связи, Минск*

*<sup>1</sup>ГПНО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» НАН Беларуси, Минск*

## **ВЫБОР ЛЮМИНОФОРА ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАТОРОВ**

Приведены результаты исследования квантового выхода люминофора для изготовления визуализаторов. Образцы люминофора изготовлены в ГПНО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» НАН Беларуси. Квантовый выход исследуемых образцов составил  $11 \cdot 10^{-5}$  -  $20 \cdot 10^{-5}$ .

O.V. KOCHERGINA, A.O. ZENEVICH, N.I. MUKHUROV<sup>1</sup>

*Belarusian State Academy of Telecommunications, Minsk*

*<sup>1</sup>State Scientific and Production Association of Optics, Optoelectronics and Laser Technology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk*

## **CHOICE OF A PHOSPHOR FOR VISUALIZERS**

The results of a study of the quantum yield of a phosphor for the manufacture of visualizers are presented. Phosphor samples were manufactured at the SSRI «Optics, Optoelectronics, and Laser Technology» of the National Academy of Sciences of Belarus. The quantum yield of the studied samples was  $11 \cdot 10^{-5}$  -  $20 \cdot 10^{-5}$ .

В настоящее время при настройке и эксплуатации лазерных систем, излучающих в ближнем инфракрасном диапазоне, широкое распространение получили визуализаторы [1, 2]. Данные устройства предназначены для преобразования инфракрасного излучения, невидимого человеческому глазу, в видимую область спектра. Принцип их действия основан на применении специально синтезированного люминофора, проявляющего антистоксовую люминесценцию, то есть способного излучать свет с большей энергией, чем энергия поглощённого излучения [3, 4]. Целью исследования стало определение квантового выхода люминофоров для визуализаторов.

В ГПНО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» НАН Беларуси был разработан и изготовлен люминофор для визуализаторов ближнего инфракрасного излучения. Рабочий элемент устройства представлял собой пластину (шайбу), на поверхность которой нанесён слой данного люминофора. В качестве активного материала применялись синтезированные порошки на основе оксида алюминия, легированного ионами эрбия ( $\text{Er}^{3+}$ ) и иттербия ( $\text{Yb}^{3+}$ ) в определённых соотношениях, приведённых в таблице 1.



Синтез люминофора осуществлялся с использованием модифицированного метода Печини [5]. Указанный метод включает стадии образования металлоорганических (хелатных) комплексных соединений, протекание полимеризационно-этерификационной реакции между органической кислотой и многоатомным спиртом (например, лимонной кислотой и этиленгликолем), а также последующее кальцинирование полученного полимерного прекурсора. Применение данного метода обусловлено его технологической простотой, универсальностью и возможностью получения высокооднородных порошков по сравнению с альтернативными методами синтеза.

Для проведения исследования использовался лазер с оптическим излучением 980 нм. При этом, длина волны антистоксовой люминесценции составила 650 нм. Результаты исследования приведены в табл. 1.

Таблица 1. Квантовый выход визуализаторов

| Концентрация действующего вещества | Соотношение компонентов в образце |       |       | Квантовый выход, $10^{-5}$ |
|------------------------------------|-----------------------------------|-------|-------|----------------------------|
|                                    | Al, %                             | Er, % | Yb, % |                            |
| 1 к 8                              | 85,0                              | 1,7   | 13,3  | 11                         |
| 2 к 6                              | 86,8                              | 3,3   | 9,9   | 16                         |
| 4 к 6                              | 83,7                              | 6,5   | 9,8   | 14                         |
| 5 к 5                              | 83,8                              | 8,1   | 8,1   | 20                         |

Таким образом, квантовый выход исследуемых образцов составил  $11 \cdot 10^{-5}$  -  $20 \cdot 10^{-5}$ . Наибольшее значение квантового выхода наблюдается для образца с равным содержанием эрбия и иттербия (5:5), что указывает на оптимальный баланс между концентрацией донорных ( $Yb^{3+}$ ) и акцепторных ( $Er^{3+}$ ) ионов в процессе энергетического переноса. При низком содержании  $Er^{3+}$  наблюдается недостаточная эффективность люминесценции, что обусловлено малым числом центров излучения. С другой стороны, чрезмерное увеличение концентрации иттербия (при низком содержании  $Er^{3+}$ ) также снижает эффективность передачи энергии.

#### Список литературы

1. Ovsyankin V.V., Feofilov P.P. // Letters to JETF. 1966. No. 4. P. 471-473.
2. Lyapin A.A., Ryabochkina P.A., Chabushkin A.N., Ushakov S.N., Fedorov P.P. // Applied Photonics. 2014. No. 1. P. 58-65.
3. Evstropov T.O., Balabanov S.S. // Special issue of Photon Express Science. 2023. No. 6. P. 343-344.
4. Sharonov G.V. // Patent on a useful model BY No 11035 from 01.02.2016.
5. Vaishlya E.I., Afanaseva E.V., Andreeva V.D., Kolesnikov I.E. // Inorganic materials. 2021. V. 57. No. 8. P. 846-851.

М.В. ДЯДЕНКО

*Белорусский государственный технологический университет, Минск***БОРОСИЛИКАТНЫЕ СТЁКЛА ДЛЯ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ**

Приведены результаты разработки составов стёкол для световедущей жилы, светотражающей и защитной оболочек жёсткого оптического волокна. Показаны оптимальные значения соотношений  $B_2O_3 / SiO_2$  и  $B_2O_3 / (SiO_2 + B_2O_3)$ , при которых получают на основе боросиликатных стёкол оптическое волокно с апертурой  $A > 1,0$ , требуемой геометрией световодов и чистотой поля зрения.

M.V. DYADENKO

*Belarusian State Technological University, Minsk***BOROSILICATE GLASS FOR FIBER OPTICS**

The results of the development of glass compositions for a light-guiding core, reflective and protective coats of the rigid optical fiber are presented. The optimal values of the ratios  $B_2O_3 / SiO_2$  and  $B_2O_3 / (SiO_2 + B_2O_3)$  are shown. It is appropriate to obtain an optical fiber with an aperture of  $A > 1.0$ , the required fiber geometry and the purity of the field of view based on borosilicate glasses at the specified oxide ratios.

Совместимость стёкол световедущей жилы, светоотражающей и защитной оболочки, на основе которых получают жёсткое оптическое волокно, определяется устойчивостью их стеклообразного состояния, химической устойчивостью к влажной атмосфере, согласованием по показателю преломления, вязкости и термическому расширению. Данным требованиям в значительной мере отвечают боросиликатные стёкла с определённой величиной отношений  $SiO_2/(SiO_2+B_2O_3)$ ,  $B_2O_3/(SiO_2+B_2O_3)$  и  $B_2O_3/SiO_2$ .

Целью настоящей работы является разработка высокотехнологичных стёкол для получения жёсткого многожильного оптического волокна методом «штабик-трубка», не проявляющих признаки фазового разделения в интервале температур до  $1100^\circ C$  и согласованных между собой по величине показателя преломления, температурному коэффициенту линейного расширения (ТКЛР) и вязкостным характеристикам в интервале значений  $10^9 - 10^5$  Па·с.

Основой для синтеза стекла световедущей жилы явилась система  $BaO-La_2O_3-B_2O_3-TiO_2-SiO_2$ , а стёкол светотражающей и защитной оболочек –  $R_2O-B_2O_3-SiO_2$  (где  $R_2O - Li_2O, Na_2O$  и  $K_2O$ ).

Экспериментально подтверждено, что получение жёсткого многожильного оптического волокна с апертурой  $A > 1,0$ , требуемой геометрией световодов и чистотой поля зрения достигается при молярных соотношениях в составах исследуемых стёкол  $B_2O_3/SiO_2$ , составляющем 0,75 - 0,95, и  $B_2O_3/(SiO_2+B_2O_3) - 0,53 - 0,58$ .

При указанных соотношениях оксидов в составах опытных стёкол в их структуре формируются структурносовместимые боро- и кремнекислородных группировки, наличие которых исключает развитие процессов фазового разделения на границах разделов «световедущая жила–светоотражающая оболочка–защитная оболочка», а также обуславливает согласование указанных стёкол по величине показателя преломления, ТКЛР и вязкостным характеристикам.

При разработке состава стекла защитной оболочки важную роль играет влияние его химического состава на теплоёмкость и теплопроводность, от которых зависит качество формируемых световодов и скорость выравнивания температуры по их сечению в процессе вытягивания волокна.

Выявлено, что изменение содержания  $SiO_2$  и  $B_2O_3$  в составах стёкол защитной оболочки определяет параболический характер зависимости теплоёмкости и теплопроводности от содержания указанных оксидов. Это обусловлено различием в степени развитости борокремнекислородного структурного каркаса стекла и характера распределения оксидов-стеклообразователей [1, 2].

Установлено, что согласование исследуемых боросиликатных стёкол по показателям теплоёмкости и теплопроводности достигается при молярном соотношении  $B_2O_3/(Na_2O+K_2O)$ , составляющем 2,7 - 3,1, и использовании  $SiO_2$  в количестве 42 - 52 мол. %.

Исследовано влияние комбинации красителей, включающей  $CoO$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $FeO$ ,  $NiO$  и  $Mn_2O_3$ , в различном соотношении, на теплофизические и спектральные свойства опытных стёкол для защитной оболочки.

Экспериментальными исследованиями выявлено, что в качестве красителей следует использовать в составе стекла защитной оболочки оксиды  $CoO$ ,  $NiO$  и  $Mn_2O_3$  сверх 100 % в соотношении 1 : 2 : 2 при суммарном их содержании 0,75 - 0,80 мас. %, что исключает нарушение частотно-контрастных характеристик и предупреждает диффузию ионов-красителей в процессе получения одножильного и многожильного оптического волокна, а также волоконно-оптических изделий.

#### *Список литературы*

1. Тугов И.И., Кострыкина Г.И. Химия и физика полимеров. М.: Химия, 1989.
2. Берман Р. Теплопроводность твердых тел. М.: Мир, 1979.

Е.В. НИФОНТОВА<sup>1,2</sup>, А.Д. ШЕВЦОВА<sup>1,2</sup>, А.С. ВАХРУШЕВ<sup>1</sup>,  
Ю.О. ШАРОНОВА<sup>1</sup>, А.В. ПЕРМИНОВ<sup>2</sup>, И.С. АЗАНОВА<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Пермская научно-производственная приборостроительная компания

<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет

## **РАДИАЦИОННО СТОЙКИЕ АКТИВНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА, СОХРАНЯЮЩИЕ ПОЛЯРИЗАЦИЮ: КРАТКИЙ ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР**

Приведены результаты краткого литературного обзора о разработке и исследованиях радиационно стойких (РС) активных оптических волокон (ОВ), сохраняющих поляризацию (далее анизотропные). Продемонстрированы достижения, полученные в ходе внедрения данного типа ОВ в различные схемы оптоэлектронных устройств.

E.V. NIFONTOVA<sup>1,2</sup>, A.D. SHEVTSOVA<sup>1,2</sup>, A.S. VAKHRUSHEV<sup>1</sup>,  
Yu.O. SHARONOVA<sup>1</sup>, A.V. PERMINOV<sup>2</sup>, I.S. AZANOVA<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Perm Scientific-Manufacturing Instrument making Company

<sup>2</sup>Perm National Research Polytechnic University

## **RADIATION-RESISTANCE ACTIVE OPTICAL FIBERS THAT POLARIZATION-MAINTAINING: A BRIEF OVERVIEW**

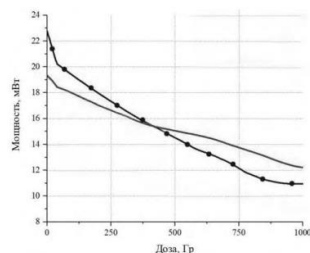
The results of a review on the development and research of radiation-resistant (RS) active optical fibers (OF) that polarization-maintaining (hereinafter anisotropic) are presented. The achievements obtained during the implementation of this type of optoelectronic devices in various circuits of optoelectronic devices are demonstrated.

Анизотропные оптические волокна (АОВ), легированные редкоземельными элементами ( $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Bi}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$ ) можно использовать с целью управления оптическим излучением, генерируемым редкоземельными ионами, а именно: усиление излучения на одной длине волны или генерация нескольких ортогонально-поляризованных мод [1]. Использование данной специфики активного АОВ в уже существующих конструкторских решениях (усилители, лазеры и т.д.) позволит расширить спектр их возможностей, а также поспособствует в разработке новых устройств. Вдобавок, улучшение РС характеристик такого волокна позволит использовать вышеуказанные устройства в зонах с воздействием ионизирующего излучения (ИИ).

Интерес к последствиям воздействия ИИ на АОВ и активные ОВ проявляют уже давно. В работе [2] продемонстрированы результаты  $\gamma$ - и протонного облучения разного типа волокон. Опираясь на полученные значения, можно сделать вывод, что АОВ и активные (эрбиевые) ОВ пригодны для использования в зонах лишь с небольшим радиационным фоном. В дальнейшем активное ОВ и АОВ были объединены в одну конструкцию, что открыло новые функциональные возможности для уже привычных устройств (лазеры, датчики и т.д.) [3 - 6].

В последние годы интерес к таким волокнам растёт. В работе [7] представлены результаты изготовления РС эрбиевого АОВ инженерами ПАО «ПНППК». Данное волокно исследовалось на стойкость к  $\gamma$ -лучам вместе с РС эрбиевым изотропным ОВ (ИОВ). Для проведения работ данные ОВ были включены в схему суперлюминесцентного волоконного источника (СВИ). На рис. 1 представлен график сравнения результатов облучения, на котором видно, что СВИ с эрбиевым АОВ больше подходит для работы в зонах воздействия ИИ, так как в конце облучения имеет более высокое значение выходной оптической мощности нежели СВИ с эрбиевом ИОВ.

Рис. 1. Зависимость оптической мощности СВИ от дозы облучения активного волокна, график с точками – изотропное ОВ, график без точек – анизотропное ОВ



В заключение следует отметить, что количество исследований РС активных ОВ будет расти в связи с заинтересованностью коммерческих организаций в их использовании, например, в космической области для улучшения эксплуатационных характеристик устройств и систем на основе волоконных источников оптического излучения.

#### Список литературы

1. Елопов А.В. // Тезисы докладов Школы-конференции молодых ученых «Прохоровские недели». 2025. V. 1. P. 20-22.
2. Mansoor A., Jaroslaw A., et al. // University of Ottawa. 2002.
3. Zhang C., Liu L., et al. // Optics Communications. 2011. V. 284. P. 2550-2553.
4. Luo H.-Y., Wang Y.-Z., et al. // J. of El. Science and Technology 2022. V. 20. P. 100147.
5. Wang Y., Luo H. // Optics Communications. 2022. V. 504. P. 127482
6. Fan X., He Z., Notate K. // Optics Express. 2006. V. 14. P. 556-561.
7. Вахрушев А.С., Нурмухаметов Д.И. и др. // Фотон-экспресс. 2019. С. 368-369.

М.К. БРАЖНИКОВ<sup>1,2</sup>, В.И. ПАВЛОВ<sup>1</sup>, Н.П. ХАТЫРЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических  
и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская обл.*

<sup>2</sup>*Московский университет геодезии и картографии (МИИГАиК)*

## **МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ НА ОСНОВЕ U-ИЗОГНУТЫХ ВОЛОКОН**

Данная статья представляет обзор методов изготовления оптических сенсоров на основе U-изогнутых полимерных волокон (ПММА). Эти перспективные датчики применяются в химическом анализе, биомедицинской диагностике и экологическом мониторинге. Принцип их работы основан на зависимости интенсивности проходящего через изгиб излучения от показателя преломления окружающей среды. Основное внимание уделено стандартизированным технологическим методам, обеспечивающим воспроизводимость критических характеристик, таких как радиус изгиба. Рассматриваются три основных метода. Тестирование волокон, изготовленных по этим методикам, подтвердило их работоспособность и чувствительность к изменению измеряемого параметра, что позволило реализовать прототип оптического сенсора.

M.K. BRAZHNIKOV<sup>1,2</sup>, V.I. PAVLOV<sup>1</sup>, N.P. KHATYREV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering,  
Mendeleevo, Moscow region*

<sup>2</sup>*Moscow University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK)*

## **METHODS FOR FABRICATING U-BENT OPTICAL FIBER SENSORS**

This article provides an overview of methods for manufacturing optical sensors based on U-curved polymer fibers (PMMA). These promising sensors are used in chemical analysis, biomedical diagnostics, and environmental monitoring. The principle of their operation is based on the dependence of the intensity of radiation passing through the bend on the refractive index of the environment. The main focus is on standardized technological methods that ensure reproducibility of critical characteristics such as bending radius. Three main methods are considered. Testing of fibers manufactured using these techniques confirmed their operability and sensitivity to changes in the measured parameter, which made it possible to implement a prototype optical sensor.

В настоящей статье рассматриваются известные к настоящему моменту наиболее распространённые методы изготовления оптических сенсоров на основе U-изогнутых полимерных волокон (ПММА). Вместе с

тем эффективность их применения и технические и метрологические характеристики связаны с технологическими приемами, используемыми при изготовлении U-образных чувствительных элементов из полимерного оптического волокна.

В настоящее время для формирования U-образных волоконных сенсоров применяются три основных технологических метода. Наиболее распространённым является метод контролируемого термомеханического формования [1], основанный на локальном нагреве волокна в пламени горелки. Альтернативным способом является метод термического формования с использованием оправки [2], при котором волокно нагревается до температуры пластификации полимера и изгибается на металлической оправке заданного диаметра. В работе [3] волокно изгибают до нужной формы механическим способом, затем фиксируют форму термической обработкой. Этот метод включает этап релаксации внутренних напряжений. Каждый из методов показал свою эффективность при создании чувствительных элементов. Волоконные элементы, изготовленные по описанным технологиям, были интегрированы в корпус оптического сенсора (рис. 1). Тестирование прототипа в средах с известными показателями преломления подтвердило их воспроизводимость результатов при замене U-образных чувствительных элементов друг на друга, а также устойчивость результатов при повторных экспериментах.

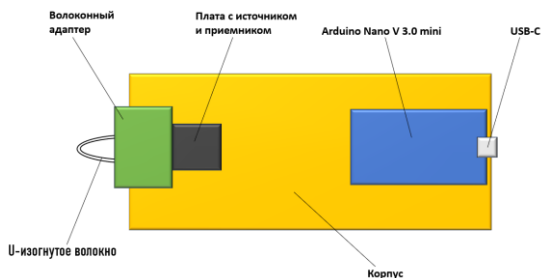


Рис. 1. Схема волоконно-оптического сенсора

#### *Список литературы*

1. Fang Y.L., Wang C.T., Chiang C.C. A small U-shaped bending-induced interference optical fiber sensor for the measurement of glucose solutions // *Sensors*. 2016. V. 16. No. 9. P. 1460.
2. Chen K.C., et al. Glucose sensor using U-shaped optical fiber probe with gold nanoparticles and glucose oxidase // *Sensors*. 2018. V. 18. No. 4. P. 1217.
3. Tabaru T.E., Hayber Ş.E. U-shaped POF sensor for ethanol/methanol determination // *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*. 2021. V. 37. No. 1. P. 149-156.

А.А. ЧУВЫЗГАЛОВ<sup>1,3</sup>, В.С. САДИЛОВ<sup>2</sup>, В.А. МАКСИМЕНКО<sup>1</sup>,  
А.И. ЛИВАШВИЛИ<sup>4</sup>, В.В. КРИШТОП<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет

<sup>2</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет

<sup>3</sup>Пермская научно-производственная приборостроительная компания, Пермь

<sup>4</sup>Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск

## **ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ МИНИАТЮРНЫЙ МАГНИТОМЕТР НА ОСНОВЕ КОЛЬЦЕВОГО РЕЗОНАТОРА**

В работе представлена схема волоконно-оптического магнитометра, основанная на эффекте Фарадея. Ключевой особенностью схемы является использование замкнутого резонансного контура для усиления магнитооптического эффекта. В представленной схеме используется эффект Саньяка для детектирования магнитного поля и последующего создания миниатюрного магнитометра с точностью порядка  $10^{-10}$  Тл.

A.A. CHUVYZGALOV<sup>1,3</sup>, V.S. SADILOV<sup>2</sup>, V.A. MAKSIMENKO<sup>1</sup>,  
A.I. LIVASHVILI<sup>4</sup>, V.V. KRISHTOP<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Perm National Research Polytechnic University

<sup>2</sup>Perm National Research State University

<sup>3</sup>Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company

<sup>4</sup>Far Eastern State Transport University, Khabarovsk

## **FIBER-OPTIC MINIATURE MAGNETOMETER BASED ON A RING RESONATOR**

This paper presents a fiber-optic magnetometer circuit based on the Faraday effect. A key feature of the circuit is the use of a closed resonant circuit to enhance the magneto-optical effect. The presented circuit utilizes the Sagnac effect to detect a magnetic field and subsequently create a miniature magnetometer with an accuracy of about  $10^{-10}$  T.

Основу миниатюрного магнитометра на основе магнитооптического эффекта Фарадея в данной работе составляет SPUN-световод, который изготавливается вытяжкой из вращающейся заготовки с сильным встроенным линейным двулучепреломлением. Благодаря винтовой структуре осей встроенного линейного двулучепреломления в SPUN-световоде достигается компромисс между высокой магнитооптической чувствительностью и устойчивостью его поляризационных свойств к деформациям [1, 2].



Основной областью применения оптических световодов со спиральной структурой осей встроенного двулучепреломления является их использование в качестве чувствительного элемента волоконно-оптических датчиков на основе эффекта Фарадея. При воздействии магнитного поля на линейно-поляризованный свет происходит вращение плоскости поляризации света, однако, при воздействии на циркулярно-поляризованный свет, эффект увеличивается в два раза [3].

Для измерения сдвига фазы в волоконно-оптическом магнитометре стандартно применяется схема с зеркалом Фарадея. Мы предлагаем замкнутую схему волоконно-оптического гироскопа для детектирования магнитного поля с помощью смещения фазы в чувствительной части схемы из SPUN-световода. При воздействии магнитного поля на световую волну с круговой поляризацией изменяется фазовая скорость этой волны. Если сравнивать между собой две противоположные волны (как по направлению самой волны, так и по направлению вращения светового вектора) то по разнице фаз можно судить о величине воздействующего магнитного поля [4]. Меняя фазу излучения приложенным магнитным полем, можно интерпретировать фазу Саньяка в детектирование магнитного поля.

Линейно поляризованный свет, проходя через оптический циркулятор, попадает на схему интегрально-оптическую многофункциональную, где он разделяется на два равных пучка. После этого пучок света попадает в волоконный кольцевой резонатор, состоящий из двух одинаковых оптических делителей, далее, свет поступает из делителя на контур SPUN-световода, проходя при этом волоконную четвертьволновую пластинку. Вокруг контура SPUN-световода намотан проводник тока (200 витков). После прохождения SPUN-световода свет вновь преобразуется в линейно поляризованный и через циркулятор попадает на фотоприёмник.

#### *Список литературы*

1. Губин В.П., Исаев В.А., Моршнев С.К., Сазонов А.И., Старостин Н.И., Чаморовский Ю.К., Усов А.И. Использование волоконных световодов типа Spun в датчиках тока // Квантовая электроника. 2006. Т. 36. № 3. С. 287-291.
2. Пржиялковский Я.В., Моршнев С.К., Старостин Н.И., Губин В.П. Модифицированный чувствительный элемент волоконно-оптического датчика тока на spun-волокне с малой собственной эллиптичностью // Квантовая электроника. 2014. Т. 44. № 10. С. 957-964.
3. Wang Z., et al. Closed-loop method based on faraday effect in resonant fiber optic gyro employing a low coherence-noise resonator // Journal of Lightwave Technology. 2021. V. 39. No. 21. P. 6994-7000.
4. Lefevre H.C. // Artech house, 2014.

В.И. ПАВЛОВ<sup>1</sup>, М.К. БРАЖНИКОВ<sup>1,2</sup>, Н.П. ХАТЫРЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических  
и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская обл.*

<sup>2</sup>*Московский университет геодезии и картографии (МИИГАиК)*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕНСОРА НА ОСНОВЕ U-ОБРАЗНОГО ВОЛОКНА С ФУНКЦИЕЙ СПЕКТРАЛЬНОГО ШТРИХ-КОДИРОВАНИЯ**

Представлены результаты математического моделирования волоконно-оптического сенсора на основе U-образного волокна с функцией спектрального штрих-кодирования. Рассмотрены перспективы применения данного подхода для создания многопараметрических сенсорных систем в биомедицине и экологическом мониторинге.

V.I. PAVLOV<sup>1</sup>, M.K. BRAZHNIKOV<sup>1,2</sup>, N.P. KHATYREV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering,  
Mendeleevo, Moscow region*

<sup>2</sup>*Moscow University of Geodesy and Cartography (MIIGAik)*

## **MODELING OF A SENSOR BASED ON A U-SHAPED FIBER WITH A SPECTRAL BARCODING FUNCTION**

The results of mathematical modeling of a fiber-optic sensor based on U-shaped fiber with spectral barcode function are presented. The prospects for the application of this approach for the creation of multiparameter sensor systems in biomedicine and environmental monitoring are considered.

Оптические сенсоры на основе U-изогнутого волокна с функцией спектрального штрих-кодирования представляют собой перспективную платформу для создания многопараметрических сенсорных систем [1]. Ключевыми преимуществами являются возможность одновременного детектирования нескольких параметров окружающей среды, высокая воспроизводимость сигналов и простота реализации [2]. Разработана математическая модель, учитывающая основные физические процессы в U-образном волокне: потери на излучение в области изгиба, эванесцентное взаимодействие с окружающей средой и зависимость оптических потерь от длины волны. Модель включает шесть источников излучения в диапазоне 405 - 850 нм и позволяет варьировать геометрические параметры волокна (диаметр 0.5 - 2.0 мм, радиус изгиба 1 - 10 мм).

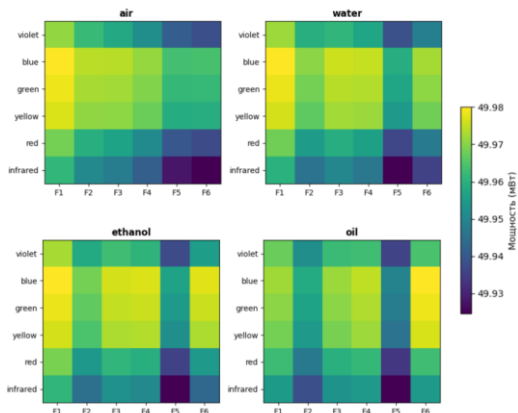


Рис. 1. Матрица спектральных штрих-кодов сенсора, по вертикальной оси – светодиоды с длинами волн 405 - 850 нм, по горизонтальной – геометрические параметры U-образных волокон (диаметр 0,5 - 2,0 мм, радиус изгиба 1 - 10 мм)

В ходе моделирования установлено, что вариация геометрических параметров волокна позволяет генерировать уникальные спектральные паттерны для различных сред (рис. 1). Показано, что чувствительность сенсора максимальна при радиусе изгиба 1 - 6 мм. Модель демонстрирует селективность к показателю преломления среды в диапазоне 1.0 - 1.47 RIU. Подтверждена возможность детектирования различных жидких сред (вода, этанол, глицерин, масло) по уникальным штрих-кодам прошедшего излучения. Разработанный подход открывает возможность генерации репрезентативных синтетических датасетов, включающих спектральные отпечатки различных сред и материалов, для обучения нейронных сетей, что позволяет создавать компактные многопараметрические сенсорные системы нового поколения, способные одновременно детектировать множественные физико-химические параметры в широком спектре приложений, включая экологический мониторинг, биомедицинскую диагностику, микробиологическую промышленность и другие области, требующие высокоточной мультиплексной детекции.

#### *Список литературы*

1. Tan A.J.Y., et al. Trends and applications of U-shaped fiber optic sensors: a review // IEEE Sensors Journal 2020. V. 21. No. 1.
2. Бельский Д.И. Перспективы развития средств измерения массовой концентрации аэрозольных частиц в Российской Федерации // Альманах современной метрологии. 2023. № 1 (33). С. 311-314.

И.Ю. БУШУЕВ, И.В. БОГАЧКОВ

*Омский государственный технический университет*

## **АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БРИЛЛЮЭНОВСКОГО ОПТИЧЕСКОГО РЕФЛЕКТОМЕТРА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН**

Проведён анализ эффективности применения бриллюэновских рефлектометров (BOTDR) для решения задач мониторинга волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). Рассмотрены физические принципы, лежащие в основе метода, в частности, зависимость бриллюэновского частотного сдвига от температуры и механической деформации оптического волокна. Проведено сравнение с традиционными методами диагностики на основе OTDR. Отмечены основные преимущества BOTDR.

I.Yu. BUSHUEV, I.V. BOGACHKOV

*Omsk State Technical University*

## **ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF USING A BRILLOUIN REFLECTOMETER FOR MONITORING OF OPTIC FIBER**

This work analyzes the effectiveness of using Brillouin optical time-domain reflectometers (BOTDRs) for monitoring fiber-optic communication lines (FOCLs). The physical principles underlying the method are discussed, in particular, the dependence of the Brillouin frequency shift on temperature and mechanical deformation of the optical fiber. A comparison is made with traditional diagnostic methods based on OTDR. The main advantages of BOTDRs are identified.

Для обычного кварцевого одномодового волокна на длине волны 1550 нм бриллюэновский сдвиг составляет примерно 10,8 - 11,0 ГГц. Чувствительность к деформации составляет около 490 МГц/% (0,05 % деформации вызывают сдвиг частоты на 25 МГц), а чувствительность к температуре – примерно 1,0 МГц/°С [1].

Принцип работы BOTDR заключается в послылке в волокно мощного зондирующего оптического импульса и анализе спектра спонтанного бриллюэновского рассеянного излучения, приходящего с различных участков линии. Измеряя для каждой точки волокна частоту, на которой наблюдается пик бриллюэновского рассеяния, и зная исходное калибровочное значение, можно построить распределённые профили деформации и температуры по всей длине ВОЛС.

Для оценки эффективности BOTDR проведем сравнение его возможностей с OTDR по ключевым параметрам диагностики. Как видно из табл. 1, основное преимущество BOTDR заключается в его способности измерять физические параметры (деформацию и температуру), что открывает возможности для прогнозирования отказов.

Таблица 1

| Критерий диагностики                           | OTDR                  | BOTDR                 | Вывод                       |
|------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------|
| Обнаружение обрывов                            | Высокая эффективность | Высокая эффективность | Методы сопоставимы          |
| Обнаружение макроизгибов                       | Эффективно            | Эффективно            | Методы сопоставимы          |
| Измерение потерь в неоднородностях             | Высокая точность      | Косвенная оценка      | Преимущество у OTDR         |
| Обнаружение механических напряжений/деформаций | Неэффективно          | Высокая эффективность | Ключевое преимущество BOTDR |
| Распределённое измерение температуры           | Неэффективно          | Высокая эффективность | Ключевое преимущество BOTDR |
| Прогнозирование деградации                     | Ограничено            | Высокая эффективность | Ключевое преимущество BOTDR |

Проведённый анализ демонстрирует высокую эффективность применения бриллюэновских рефлектометров (BOTDR) для мониторинга и диагностики ВОЛС. В отличие от традиционного OTDR, метод BOTDR предоставляет уникальную возможность распределённого измерения деформации и температуры, что переводит обслуживание сетей из реактивного в предиктивный режим.

Наиболее эффективно применение BOTDR для мониторинга критически важных и труднодоступных объектов. Хотя метод имеет определённые ограничения по дальности, разрешению и времени измерения, постоянное совершенствование аппаратной части и алгоритмов обработки сигналов позволяет успешно их преодолевать. Внедрение BOTDR в практику эксплуатации ВОЛС является важным шагом для повышения надежности телекоммуникационных систем.

#### *Список литературы*

1. Bao X., Chen L. Recent progress in Brillouin scattering based fiber sensors // Sensors. 2011. V. 11. No. 4. P. 4152-4187.
2. Мохаммади Л., Лесаж Ф.П. Применение распределенных волоконно-оптических датчиков для мониторинга подводных трубопроводов и кабелей // Датчики и системы. 2018. № 5. С. 44-51.

А.Р. СОВЕТОВА<sup>1,2</sup>, В.В. КРИШТОП<sup>1,2,3</sup>, А.В. ПЕРМИНОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет

<sup>2</sup>Пермская научно-производственная приборостроительная компания

<sup>3</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет

## **ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИЙ АМПЛИТУДНЫЙ МОДУЛЯТОР С ЦИФРОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ДЛЯ ОПРОСА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

В работе рассмотрены преимущества интегрально-оптического амплитудного модулятора с цифровым управлением. Сегодня представленные модуляторы имеют аналоговую обработку сигнала, что влечёт за собой использование цифро-аналоговых преобразователей. При создании сложных оптических соединений, когда необходимо применять, например, квадратурную амплитудную модуляцию, для управления модулятором требуется использование нескольких ЦАП, что снижает надежность системы. Актуальной задачей является создание оптических устройств с прямым цифровым управлением, в частности, модулятора.

A.R. SOVETOVA<sup>1,2</sup>, V.V. KRISHTOP<sup>1,2,3</sup>, A.V. PERMINOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Perm National Research Polytechnic University

<sup>2</sup>Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company

<sup>3</sup>Perm State National Research University

## **INTEGRATED OPTICAL AMPLITUDE MODULATOR WITH DIGITAL CONTROL FOR POLLING AN OPTICAL DATA CONVERTER**

This paper examines the advantages of an integrated optical amplitude modulator with digital control. Currently available modulators utilize analog signal processing, which necessitates the use of digital-to-analog converters. When creating complex optical connections, such as quadrature amplitude modulation, controlling the modulator requires the use of multiple digital-to-analog converters, which reduces system reliability. A pressing challenge is the creation of optical devices with direct digital control, specifically modulators.

Интерферометр Маха–Цендера является одним из базовых компонентов интегральной оптоэлектроники. На его основе возможно создание амплитудного модулятора с прямым цифровым управлением (рис. 1).

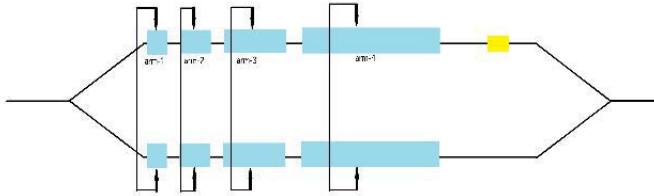


Рис. 1. Схема амплитудного модулятора с прямым цифровым управлением на основе многэлектродного интерферометра Маха–Цендера [1]

Полуволновое  $U_{1/2}$  напряжение прямо пропорционально длине электродов:

$$U_{1/2} = \frac{\lambda}{2 \cdot n_{eff}^3 \cdot r_{eff} \cdot \Gamma} \cdot \frac{L}{L_{eff}},$$

где  $\lambda$  – длина волны излучения,  $n_{eff}^3$  – эффективный показатель преломления,  $r_{eff}$  – электрооптический коэффициент,  $\Gamma$  – фактор взаимодействия,  $L$  – длина электродов.

Модулятор с разной длиной электродов (сегментированный модулятор) используется для эффективного управления фазой световой волны в широком диапазоне частот, что позволяет модулировать сложные аналоговые сигналы с высокой скоростью и линейностью. Такая конструкция позволяет снять неоднозначность при регистрации оптическими методами значений электрического потенциала, что невозможно реализовать в схеме с двумя электродами.

#### Список литературы

1. Chen Y., et al. Segmented Mach-Zehnder modulator for high-level PAM generation // 2020 21st International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT). IEEE, 2020. P. 1-4.
2. Кузнецов И.В., Перин А.С. Исследование характеристик электрооптического модулятора в конфигурации интерферометра Маха–Цендера на основе тонких плёнок ниобата лития // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 2. С. 68-77.

М.М. ВЕКШИН, О.А. КУЛИШ

*Кубанский государственный университет, Краснодар*

## **ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛНОВОДЫ В СТЕКЛЕ С ПОПЕРЕЧНЫМ СЕЧЕНИЕМ КАНАЛА В ФОРМЕ КОЛЬЦА**

Предложено использовать технологию двухэтапной электростимулированной миграции ионов для формирования волноведущей структуры в стекле с каналом, имеющим поперечное сечение в форме кольца. Проведено моделирование процесса формирования такого волновода. Волноводы ориентированы на применение в системах оптической связи с ОАМ-модами для модового уплотнения каналов и для других целей.

М.М. VEKSHIN, O.A. CULISH

*Kuban State University, Krasnodar*

## **INTEGRATED-OPTIC RING-CORE WAVEGUIDES IN GLASS**

It is proposed to use the technology of two-stage field-assisted ion migration to form a waveguide structure in a glass with the core, having cross-section in the form of a ring. The process of forming such a waveguide has been simulated. Waveguides are intended for use in optical communication systems with OAM modes for mode multiplexing of channels and for other purposes.

Интегрально-оптические волноводы с поперечным сечением канала в форме кольца ориентированы на применение в системах связи с ОАМ модовым уплотнением каналов [1]. Целью работы является моделирование процесса формирования волноводов с такой формой сердцевины.

Для формирования волновода предложено использовать технологию двухэтапной электростимулированной миграции ионов. Первый этап процесса (рис. 1а) производится внедрением ионов  $\text{Ag}^+$  в стеклянную подложку, помещённую в расплав смеси солей  $\text{AgNO}_3\cdot\text{NaNO}_3$ , с приложением стимулирующего поля. Второй этап, формирующий структуру в форме полукольца (рис. 1б), производится путём приложения напряжения к той же подложке, помещённой в расплав соли  $\text{NaNO}_3$ . Процесс внедрения ионов  $\text{Ag}^+$  на первом этапе и ионов  $\text{Na}^+$  на втором этапе из расплавов солей происходит через одну и ту же щель в маскирующем слое алюминия, расположенном на подложке.



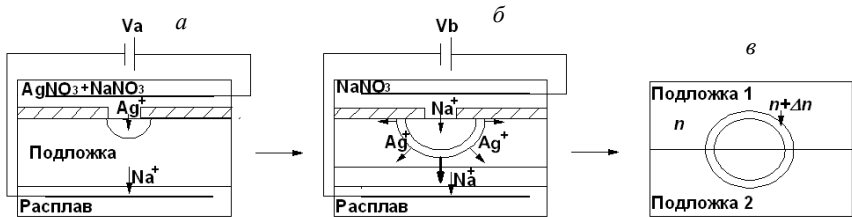


Рис. 1. Схемы этапов технологического процесса изготовления волновода (а) и (б), и результат – получение волновода с сердцевинной в форме кольца (в)

Совместив два таких волновода, полученных на различных подложках с показателем преломления  $n$ , мы получим кольцообразный в сечении волновод с показателем преломления в слое кольца  $n + \Delta n$  (рис. 1в).

Расчёт концентрации внедряемых ионов серебра был выполнен путём решения нелинейного уравнения диффузии, описывающего оба этапа технологического процесса. Результаты расчётов – графики контуров нормализованной концентрации ионов серебра в стеклянной подложке показаны на рис. 2а после первого и на рис. 2б после второго этапов.

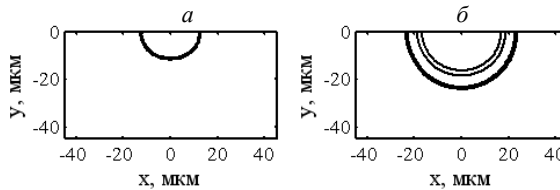


Рис. 2. Контурные графики нормализованной концентрации ионов серебра после первого (а) и второго (б) этапов процесса формирования волновода

Как видно из рис. 2б, волноводная структура имеет форму полукольца. Максимальная концентрация ионов серебра в этой области снизилась, по отношению к этому же параметру после первого этапа процесса, менее чем в 2 раза (на 40 %), что по параметрам данной технологии достаточно для обеспечения волноводного режима.

#### Список литературы

1. Chen Y., Gao J., et al Mapping twisted light into and out of a photonic chip // Physical Review Letters. 2018. V. 121. P. 23602.

И.Ю. БУШУЕВ, И.В. БОГАЧКОВ

*Омский государственный технический университет*

## **БРИЛЛЮЭНОВСКАЯ РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ: ПРИМЕНЕНИЕ В ДИАГНОСТИКЕ ВОЛС**

В данной статье рассматриваются преимущества применения бриллюэновского рефлектометра (BOTDR) для диагностики и мониторинга волоконно-оптических линий связи. Также проведён анализ области применения метода бриллюэновской рефлектометрии при различных практических сценариях.

I.Yu. BUSHUEV, I.V. BOGACHKOV

*Omsk State Technical University*

## **BRILLOUIN REFLECTOMETRY: APPLICATION IN DIAGNOSTICS OF FIBER-OPTIC COMMUNICATION LINES**

This article discusses the advantages of using the Brillouin Time Domain Reflectometer (BOTDR) for diagnostics and monitoring of fiber optic communication lines. Also analyzes the application area of the Brillouin Reflectometry (BOTDR) method in various practical scenarios.

Проанализируем эффективность применения метода бриллюэновской рефлектометрии при мониторинге при различных сценариях. При этом обычно для диагностики и мониторинга волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) используют бриллюэновский рефлектометр (BOTDR).

Магистральные ВОЛС часто прокладываются в сложных условиях: вдоль железнодорожных путей, в зонах строительства или геологической нестабильности. Применение BOTDR обладает многими преимуществами.

Например, позволяет обнаруживать участки с постоянным механическим напряжением, вызванным давлением грунта или вибрацией от проходящих поездов, а также контролировать температурный режим кабелей, проложенных в кабельной канализации, и оперативно обнаруживать перегревы [1].

Для подводных линий связи критически важным является обнаружение микроизгибов и напряжений, возникающих при движении донных грунтов, воздействии якорей судов или морских течений. BOTDR является единственным методом, позволяющим дистанционно

отслеживать такие воздействия, предотвращая дорогостоящие ремонтные работы [1, 2].

В волокнах, соединяющих стойки в центрах обработки данных, постоянные вибрации и перепады температур могут приводить к постепенной деградации. Регулярный мониторинг с помощью BOTDR позволяет выявить проблемные зоны до того, как они приведут к потере связи, в том числе и в участках, используемых в PON.

По сравнению с традиционными медными решениями, PON обладают рядом существенных преимуществ.

1. Высокая пропускная способность.
2. Энергоэффективность.
3. Масштабируемость.
4. Надежность.
5. Экономическая эффективность.

По сравнению с традиционными методами, такими как OTDR, Brillouin-метод предлагает ряд уникальных преимуществ.

Механическая деформация: Метод позволяет обнаружить участки волокна, которые подвергаются изгибам, растяжению или сжатию. Это незаменимо для мониторинга конструкций, таких как мосты, плотины, трубопроводы и фундаменты зданий, где оптическое волокно используется в качестве распределённого датчика.

Температура: BOTDR точно определяет температурные профили вдоль волокна. Это широко используется в системах противопожарной безопасности, мониторинга силовых кабелей, нефте- и газопроводов.

Высочайшая точность и чувствительность. BOTDR способны обнаруживать изменения деформации и температуры с высокой точностью. Это позволяет выявлять проблемы на ранних стадиях, до того, как они приведут к серьезным повреждениям или разрыву волокна.

Бриллюэновская рефлектометрия – это не просто инструмент для поиска неисправностей, а мощная технология распределённого мониторинга состояния оптических волокон ВОЛС.

Благодаря своей уникальной способности точных измерений деформаций и температур на больших расстояниях, BOTDR открывает новые возможности для обеспечения безопасности, надежности и долговечности ответственных объектов современной инфраструктуры.

#### *Список литературы*

1. Theodosiou A., Komodromos M. Brillouin Optical Time Domain Reflectometry (BOTDR) for Structural Health Monitoring // *Fiber Optic Sensors*. 2020. P. 1-22.
2. Ohno H., Naruse H., Kihara M., Shimada A. Industrial Applications of the BOTDR Optical Fiber Strain Sensor // *Optical Fiber Technology*. 2002. V. 8(1). P. 45-64.

Ю.А. ШКУРСКАЯ, А.В. ПОЛЯКОВ  
*Белорусский государственный университет, Минск*

## **КВАЗИРАСПРЕДЕЛЁННЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ РЕШЁТОК БРЭГГА**

Проведено численное моделирование чувствительности квазираспределённых волоконно-оптических температурных датчиков на основе решёток Брэгга с различным металлическим покрытием в диапазоне температур от  $-140$  до  $+200$  °C.

Yu.A. SHKURSKAYA, A.V. POLYAKOV  
*Belarussian State University, Minsk*

## **QUASI-DISTRIBUTED FIBER-OPTIC TEMPERATURE SENSOR BASED ON METALLIZED BRAGG GRATINGS**

Numerical modeling of the sensitivity of quasi-distributed fiber-optic temperature sensors based on Bragg gratings with different metal coatings in the temperature range from  $-140$  to  $+200$  °C was performed.

Развитие сенсорных технологий играет ключевую роль в создании высокоточных измерительных систем, применяемых в различных областях науки и техники. Одной из перспективных технологий является использование волоконно-оптических датчиков температуры (ВОДТ), основанных на решётках Брэгга. Эти датчики обладают высокой чувствительностью, компактностью и устойчивостью к электромагнитным воздействиям, что делает их незаменимыми для работы в сложных условиях, включая аэрокосмическую, нефтегазовую и медицинскую промышленность. Основными направлениями исследований являются изучение особенностей работы таких датчиков, их конструкционные параметры, методы анализа данных и перспективы дальнейшего развития. Особое внимание уделяется влиянию внешних факторов на точность измерений, а также методам повышения стабильности и чувствительности измерительных систем [1 - 3].

Волоконная брэгговская решётка (ВБР) – это участок оптического волокна, где показатель преломления сердцевины периодически изменяется вдоль продольной оси. Модуляция показателя преломления связывает основную моду световода с модой, распространяющейся в обратном направлении, и в результате излучение на определённой длине

волны, распространяющееся по оптическому волокну, может быть отражено от волоконной брэгговской решётки. Коэффициент отражения от ВБР зависит от глубины модуляции показателя преломления, а центральная длина волны отражённого излучения определяется условием Брэгга. При этом излучение на других длинах волн проходит через ВБР практически без потерь. Характеристики отражения зависят от параметров решётки. Принцип работы ВОДТ с использованием ВБР основан на зависимости изменения спектральных свойств отражённого излучения под воздействием температуры. Используя ВБР с различными параметрами, можно мультиплексировать большое число датчиков, проводя одновременные измерения в различных точках волокна на разных брэгговских длинах волн.

В результате численного моделирования с использованием разработанной математической модели показано, что металлизация волоконных решёток Брэгга, используемых в качестве чувствительных элементов в квазираспределённых волоконно-оптических датчиках температуры, увеличивает чувствительность в 3,5 - 4 раза по сравнению с полимерным покрытием в температурном интервале от  $-140$  до  $+200$  °C. В результате сравнения металлических покрытий из Al, Ni и Cu наибольшая чувствительность наблюдается для Al, при этом для уменьшения погрешности измерений эффективно увеличивать толщину покрытия до 200 нм. Установлено, что температурная чувствительность ВБР не является постоянной, это обусловлено нелинейными зависимостями показателя преломления волокна и коэффициента теплового расширения металла, что необходимо учитывать при проектировании и калибровке датчиков. При этом, увеличение спектрального смещения брэгговской длины волны отражения при изменении температуры на один градус приводит к уменьшению количества ВБР, которые можно мультиплексировать в спектральной полосе усиления оптического усилителя при условии, что спектры отдельных ВБР не будут накладываться друг на друга в указанном температурном интервале измерений, и для спектральной полосы усиления 80 нм возможно на одном волоконном световоде интегрировать до шести металлизированных ВБР.

#### *Список литературы*

1. Волошина А.В., Коробкова У.Р. и др. // Оптический журнал. 2024. Т. 91 (12). С. 84-90.
2. Samiappan D. Praveen N., et al. // Optical Fiber Technology. 2022; V. 69. P. 102831.
3. Fernández-Medina A., Frövel M., et al. // Sensors. 2023. V. 23. P. 6499.

В.А. БАДЕЕВ, А.Д. СЕРЕБРЯКОВ, Т.И. МУРАШКИНА

*Пензенский государственный университет*

## **ДВУХКАНАЛЬНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В АТТЕНЮАТОРНО-ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ МИКРОСЕНСОРАХ ДАВЛЕНИЯ**

Предложено двухканальное преобразование оптических сигналов в микрооптикоμηχανической системе волоконно-оптического датчика давления аттенюаторно-отражательного типа, позволяющее улучшить метрологические характеристики датчика.

V.A. BADEEV, A.D. SEREBRYAKOV, T.I. MURASHKINA

*Penza State University*

## **TWO-CHANNEL CONVERSION OF OPTICAL SIGNALS IN ATTENUATOR-REFLECTIVE FIBER-OPTIC PRESSURE MICROSENSORS**

A two-channel conversion of optical signals in a micro-optical-mechanical system of an attenuator-reflective fiber-optic pressure sensor is proposed, which makes it possible to improve the metrological characteristics of the sensor.

Для измерения давления в сложных условиях в работе [1] предложено использовать волоконно-оптический микросенсор давления (ВОМСД) с двумя измерительными каналами, один из которых является компенсационным, причём основной упор делается на двухканальное преобразование оптических сигналов.

В работах [1, 2] предложено световой поток с излучающего торца оптического волокна разделить на две независимые части. Такой подход возможен потому, что в дальней зоне дифракции поперечное сечение светового потока на выходе подводящего оптического волокна (ПОВ) представляет собой кольцо или эллипс (рис. 1). Деление осуществляется путём расположения одного приёмного торца первого отводящего оптического волокна (ООВ) в верхней (левой) части поперечного сечения светового потока, а приёмного торца второго ООВ – в нижней (правой) части поперечного сечения светового потока. На рис. 2 изображена упрощённая конструкция двухканального волоконно-оптического микросенсора низкого давления (ВОМСД) аттенюаторно-отражательного

типа с введением компенсационного канала, что позволило снизить большинство дополнительных погрешностей [2].



Рис. 1. Пояснение способа деления поперечного сечения полого светового конуса на две независимые части

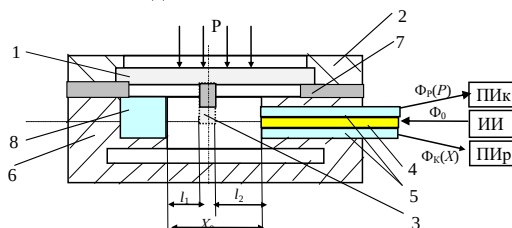


Рис. 2. Упрощенная конструкция ВОМСД с компенсационным каналом:

- 1 – мембрана, 2 – крышка, 3 – аттенуатор, 4 – подводящее оптическое волокно (ПОВ), 5 – отводящие оптические волокна (ООВ), 6 – корпус, 7 – прокладка, 8 – зеркало, ИИ – источник излучения, ПИР, ПИК – приёмники излучения рабочего и компенсационного измерительных каналов

Датчик работает следующим образом. Световой поток  $\Phi_0$ , сформированный источником излучения ИИ, по ПОВ 4 передается в зону измерений в направлении зеркальной поверхности 8. Отраженные световые потоки  $\Phi_R = f(P)$  и  $\Phi_K = \text{const}$  по ООВ<sub>Р</sub> и ООВ<sub>К</sub> поступают на рабочий ПИР и компенсационный ПИК приёмники излучения соответственно. Приёмники излучения преобразуют оптические сигналы  $\Phi_R(P)$  и  $\Phi_K$  в электрические сигналы  $I_R(P)$  и  $I_K(X = \text{const})$  соответственно. Логометрическое преобразование этих сигналов снижает большинство дополнительных погрешностей.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 25-29-20107.

#### Список литературы

1. Бадеева Е.А., Мурашкина Т.И., Серебряков Д.И., Бадеев А.В. Способ преобразования светового потока и реализующий его волоконно-оптический датчик давления. Патент на изобретение РФ 2740538. Опубликовано: 2021.01.15. Бюл. № 2.
2. Мурашкина Т.И., Бадеева Е.А. Волоконно-оптические приборы и системы. Научные разработки НТЦ «Нанотехнологии волоконно-оптических систем» Пензенского государственного университета". Ч. 1. СПб.: Политехника, 2018.

М.Е. БАТРАКОВ<sup>1,2</sup>, А.В. ШИПИЦЫН<sup>2,3</sup>, Н.С. ЛАСКАВЫЙ<sup>1,2</sup>,  
В.В. КРИШТОП<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет

<sup>2</sup>Пермская научно-производственная приборостроительная компания

<sup>3</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ОПТИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ

В рамках данной работы проведено экспериментальное исследование полупроводникового оптического усилителя (ПОУ) на длине волны 1550 нм с целью оценки его работы в рамках рециркуляционного оптического контура. Основное внимание уделено измерению поляризационных характеристик (азимутального угла, степени поляризации и эллиптичности) при изменении тока накачки, а также получение оптических спектров в различных оптических схемах на основе исследуемого ПОУ.

М.Е. BATRAKOV<sup>1,2</sup>, A.V. SHIPITSYN<sup>2,3</sup>, N.S. LASKAVIY<sup>1,2</sup>,  
V.V. KRISHTOP<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Perm National Research Polytechnic University

<sup>2</sup>Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company

<sup>3</sup>Perm National Research State University

## INVESTIGATION OF SEMICONDUCTOR OPTICAL AMPLIFIER

The paper presents an experimental study of a semiconductor optical amplifier (SOA) at a wavelength of 1550 nm was conducted to evaluate its performance within a recirculating optical loop. Primary attention was focused on measuring polarization characteristics (azimuthal angle, degree of polarization, and ellipticity) as a function of pump current, as well as obtaining optical spectra in various optical configurations based on the studied SOA.

Принцип действия полупроводникового оптического усилителя (ПОУ) основан на использовании возбуждённой эмиссии, возникающей благодаря взаимодействию фотонов входного возбуждающего излучения с электронно-дырочными парами активной среды. При этом входной сигнал – источник первичных фотонов, энергия которых должна быть достаточна, чтобы сбросить электроны с верхних уровней зоны проводимости на нижний уровень валентной зоны, где электроны и дырки рекомбинируют, вызывая появление вторичных фотонов. Последние



проходят по волноводной структуре активной области, где происходит их лавинное увеличение и выход излучения с формой, длиной волны, состоянием поляризации и другими параметрами, идентичными поступающему на вход ПОУ [1].

Для исследования выбранного ПОУ был собран простой замкнутый рециркуляционный контур (рис. 1); с равным шагом изменения тока накачки (5 мА) были получены конкретные значения азимутального угла, эллиптичности, степени поляризации излучения, а также мощности. На основе полученных данных были построены соответствующие зависимости изменения вышеназванных параметров от тока накачки. Дополнительно, при некоторых значениях тока накачки были получены спектры излучения при помощи оптического спектроанализатора. При работе ПОУ в замкнутом рециркуляционном оптическом контуре наблюдается эффект самовозбуждения, вызванный паразитной обратной связью, возникающей из-за отражений, возникающих на торцах ПОУ, тем самым образуя паразитный интерферометр Фабри–Перо, а также перекачкой ПОУ электрическим током [2]. В ходе работы, было замечено, что эффект самовозбуждения проявляется при определённых токах накачки ПОУ, что представлено на спектрах и экспериментальных зависимостях поляризационных характеристик.

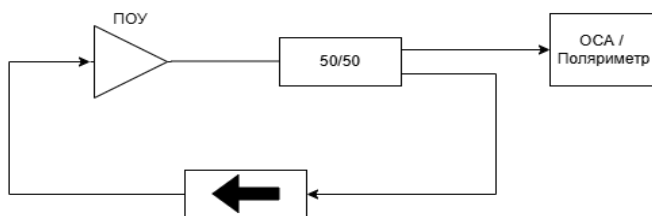


Рис. 1. Замкнутый рециркуляционный оптический контур

#### Список литературы

1. Дуряев В.П., Медведев С.В. Полупроводниковые оптические усилители в диапазоне длин волн 840- 1550 нм // Научное приборостроение. 2012. Т. 22. № 3. С. 53-57.
2. Hamerly R. Quantum noise of free-carrier dispersion in semiconductor optical cavities // Physical Review A. 2015. V. 92. No. 2. P. 023819.

А.Н. КУРИЛКИНА, А.В. ПОЛЯКОВ  
*Белорусский государственный университет, Минск*

## **ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ КВАНТОВОЙ КРИПТОГРАФИИ**

Приведены результаты исследования помехоустойчивости волоконно-оптической системы квантовой криптографии для двух длин волн 0,85 и 1,55 мкм при использовании Si-ЛФД и InGaAs-ЛФД в линейном режиме для протокола BB84 и кодирования через временные сдвиги.

A.N. KURILKINA, A.V. POLYAKOV  
*Belarussian State University, Minsk*

## **NOISE IMMUNITY OF FIBER-OPTIC QUANTUM CRYPTOGRAPHY SYSTEMS**

The results of a study of the noise immunity of a fiber-optic quantum cryptography system for two wavelengths, 0.85 and 1.55  $\mu\text{m}$ , using Si-APD and InGaAs-APD in linear mode for the BB84 protocol and time-shift coding are presented.

В современном мире информационные технологии стремительно развиваются, и вместе с этим возрастают угрозы безопасности данных. Одной из наиболее серьезных проблем является возможность взлома традиционных криптографических алгоритмов с помощью квантовых компьютеров. Это ставит под угрозу устойчивость современных криптосистем, поскольку их защищённость основана на сложности математических задач. В связи с этим возникает необходимость разработки новых методов шифрования, устойчивых к атакам с использованием квантовых вычислений. Одним из перспективных направлений является квантовая криптография, которая использует фундаментальные законы квантовой механики для обеспечения абсолютной безопасности передачи данных. В отличие от классической криптографии, где защита основана на математических предположениях, квантовая криптография опирается на физические принципы, такие как невозможность клонирования квантовых состояний и корреляция измерений запутанных частиц.

Несмотря на значительные успехи в области квантовой криптографии, остается ряд нерешённых проблем: ограниченная дальность передачи квантовых состояний из-за затухания в оптических волокнах (ОВ),

уязвимость к определённым типам атак (например, атакам на детекторы), техническая сложность и высокая стоимость реализации квантовых систем.

Предложена математическая модель, описывающая помехоустойчивость систем квантовой криптографии, для оценки битовой скорости формирования квантового распределения ключа (КРК) для двух длин волн 0,85 и 1,55 мкм при использовании Si-ЛФД и InGaAs-ЛФД в линейном режиме для протокола BB84 и кодирования через временные сдвиги [1].

Минимальная вероятность пропуска сигнала будет наблюдаться при минимуме дисперсии  $\sigma$ , которая, в свою очередь, зависит от длительности импульсной характеристики приёмного блока  $\tau$ . Установлено, что минимальные значения  $\sigma$  достигаются при  $\xi_1 = \tau/\tau_0 = 12$  для Si-ЛФД и  $\xi_2 = \tau/\tau_0 = 10$  для InGaAs-ЛФД, где  $\tau_0$  – длительность исходного сигнального импульса. Данные значения  $\sigma$  соответствуют величине нагрузочных сопротивлений  $R = 4$  МОм для Si-ЛФД и  $R = 2,5$  МОм для InGaAs-ЛФД.

Безусловная защищённость квантового канала системы КРК ограничена уровнем коэффициента квантовых ошибок  $Q\text{-BER} \approx 11\%$ , определяемый вероятностью ложной тревоги  $P_f$ , величину которой можно контролировать пороговым уровнем  $U_{\text{пор}}$ . С помощью численного моделирования показано, что данное условие выполняется при  $U_{\text{пор}} = 33$  В для Si-ЛФД и  $U_{\text{пор}} = 42$  В для InGaAs-ЛФД. Одновременно найдена вероятность пропуска сигнала  $P_l$ , которая также зависит от величины порога срабатывания решающего устройства и определяет значение битовой скорости формирования КРК.

При смещении рабочей длины волны в ближнюю ИК-область, где потери в ОВ значительно уменьшаются, необходимо дополнительно учитывать потери на стыковку оптоэлектронных элементов с ОВ [2]. Установлена зависимость битовой скорости формирования КРК для Si-ЛФД и InGaAs-ЛФД от значений оптических потерь мощности излучения, приходящихся на соединения. Из полученных графиков следует, что потери на стыковку могут приводить к уменьшению скорости генерации КРК до двух раз, что необходимо учитывать при проектировании волоконно-оптических систем квантовой криптографии.

#### *Список литературы*

1. Эскандери М.М., Хорошко Д.Б., Килин С.Я. // Журн. прикл. спект. 2019. Т. 86. № 5. С. 717-720.
2. Хорошко Д.Б., Пустоход Д.И., Килин С.Я. // Оптика и спектроскопия. 2011. Т. 111. С. 719-723.

М.М. ВЕКШИН, О.Е. ПОЛЮТОВА  
*Кубанский государственный университет, Краснодар*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОГО ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАХА–ЦЕНДЕРА $2 \times 2$**

Проведено моделирование широкополосного (1260 - 1650 нм) интерферометра Маха–Цендера  $2 \times 2$  на основе волноводов в стекле.

М.М. VEKSHIN, О.Е. POLUTOVA  
*Kuban State University, Krasnodar*

## **WIDE-BAND INTEGRATED-OPTIC MACH–ZEHNDER $2 \times 2$ INTERFEROMETER MODELING**

Wide-band (1260 - 1650 nm) Mach–Zehnder interferometer  $2 \times 2$ , based on waveguides in glass, has been simulated.

Важной задачей разработки элементов интегральной оптики для систем оптической связи является разработка разветвителей  $2 \times N$ . Такие разветвители используются для резервирования передатчиков. Целью работы является моделирование широкополосного разветвителя с двумя входами, соответствующего стандарту на элементы ВОЛС.

Существуют два варианта построения таких разветвителей. В одном из них в качестве первого каскада схемы используется широкополосный направленный ответвитель. В другом способе используется схема интерферометра Маха–Цендера. К первому каскаду схемы подключается древовидная волноводная схема Y-разветвителей. На рис. 1 показана схема разветвителя  $2 \times 4$  с применением интерферометра.

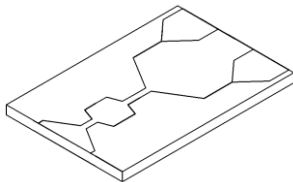


Рис. 1. Схематический вид интегрально-оптического разветвителя  $2 \times 4$

Построению широкополосного интерферометра посвящён ряд исследований [1]. Коэффициент передачи интерферометра в перекрестный выходной порт описывается формулой:

$$T = \sin^2(\varphi_{MZ}/2) \cos^2(\varphi_1 + \varphi_2) + \sin^2(\varphi_{MZ}/2) \sin^2(\varphi_1 + \varphi_2),$$

где  $0,5\varphi_1$  и  $0,5\varphi_2$  – сдвиги фаз между супермодами, накопленные прохождением волн через первый и второй ответвитель,  $\varphi_{MZ}$  – сдвиг фаз волн при прохождении через плечи интерферометра. Последняя величина обусловлена либо разностью длин плеч  $\Delta L$ ,  $\varphi_{MZ} = \beta\Delta L$ ,  $\beta$  – константа распространения волноводов, либо сдвиг фазы достигается за счёт различия констант распространения,  $\varphi_{MZ} = L\Delta\beta$ .

Для спектрально-независимого разделения излучения на равные части необходимо, чтобы  $\varphi_{MZ} = 2\pi/3$ ,  $\varphi_1 = \pi/4$  и  $\varphi_2 = \pi/2$ . Спектральная зависимость коэффициента передачи интерферометра показана на рис. 2.

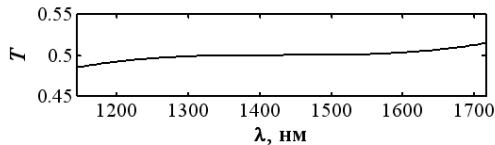


Рис. 2. Спектральная зависимость коэффициента передачи интерферометра

Если разделение излучения достигается за счёт геометрической асимметрии плеч, то величина  $\Delta L$  может быть принята из дискретного набора величин,  $\Delta L = 2(\pi/3 + k\pi)/\beta$ ,  $k$  – целое число. Минимальное значение величины  $\Delta L$  составляет 0,3 мкм для волноводов в стекле. Разделение излучения за счёт асимметрии констант распространения возможно при изменении материальных и геометрических параметров самого канала.

Та или иная технология интегральной оптики определяет выбор технического решения реализации такой схемы. Схема интерферометра был спроектирована методом распространяющегося пучка для доступной технологии ионного обмена в стекле. Общая длина схемы составила 7 мм при разделении входных каналов на 250 мкм.

#### Список литературы

1. Chen Y., Yan L., et al. Polarization insensitive and broadband optical power splitter with a tunable power splitting ratio // IEEE Photonics Journal. 2017. V. 9, No. 3. P. 250609.

М.К. БРАЖНИКОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Московский университет геодезии и картографии (МИИГАиК)*

<sup>2</sup>*Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская обл.*

## **ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДВУХДИАПАЗОННЫХ ИК-СИСТЕМ ДЛЯ ДИАПАЗОНА 3 - 12 мкм**

В статье представлен аналитический обзор проблем проектирования апохроматических двухдиапазонных инфракрасных систем для диапазона 3 - 12 мкм. Рассматриваются ключевые трудности, связанные с обеспечением хроматической коррекции и выбором материалов для средневолнового (3 - 5 мкм) и длинноволнового (8 - 12 мкм) поддиапазонов в оптической системе с фиксированной фокальной плоскостью. Проведена оценка современных решений и их ограничений, определяющая перспективные направления для создания высокоэффективных тепловизионных приборов нового поколения.

M.K. BRAZHNIKOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering,  
Mendeleevo, Moscow region*

<sup>2</sup>*Moscow University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK)*

## **PROBLEMS AND PROSPECTS OF DESIGNING DUAL-BAND IR SYSTEMS FOR THE RANGE OF 3 - 12 MICRONS**

The article presents an analytical review of the problems of designing apochromatic dual-band infrared systems for the range of 3 - 12 microns. The key difficulties associated with providing chromatic correction and the choice of materials for medium-wavelength (3 - 5 microns) and long-wavelength (8 - 12 microns) subbands in an optical system with a fixed focal plane are considered. An assessment of modern solutions and their limitations has been carried out, defining promising areas for the creation of highly efficient thermal imaging devices of a new generation.

Инфракрасные (ИК) оптические системы, функционирующие в спектральном диапазоне 3 - 12 мкм, представляют собой критически важный компонент современной оптоэлектроники и тепловизионной техники [1]. Данный диапазон, включающий два физически и функционально различных поддиапазона — средневолновой (3 - 5 мкм) и длинноволновой (8 - 12 мкм) — позволяет решать широкий спектр задач: от высокоточной идентификации объектов до эффективного обнаружения

в условиях ограниченной видимости, атмосферных помех и изменяющихся внешних условий [2].

Актуальность настоящей работы обусловлена растущей потребностью в создании универсальных, высокоэффективных тепловизионных приборов, способных работать одновременно или с оперативным переключением между этими поддиапазонами [2]. Ключевым конструктивным требованием для таких приборов является использование двухдиапазонных оптических систем с фиксированной (общей) плоскостью изображения.

Однако проектирование подобных систем сопряжено с рядом фундаментальных трудностей. Основные проблемы заключаются в необходимости обеспечения апохроматической коррекции в двух непересекающихся спектральных зонах, что осложняется значительной дисперсией оптических материалов в инфракрасной области [2, 3]. Кроме того, существует ограниченный выбор материалов, сочетающих необходимые показатели преломления и дисперсии с требуемой термостабильностью и технологичностью изготовления. Несмотря на активное использование современных средств компьютерного моделирования (таких как Zemax, Code V) и применение перспективных материалов (германий, селенид цинка, халькогенидные стёкла), задача создания компактных, технологичных и высококачественных двухдиапазонных объективов остаётся сложной и не до конца решённой.

Целью данной статьи является проведение проблемно-ориентированного аналитического обзора современного состояния дел в области проектирования ИК-систем для диапазона 3 - 12 мкм. В работе систематизируются ключевые проблемы, детально анализируются физические и оптические особенности работы в указанных поддиапазонах, а также проводится оценка потенциала и ограничений существующих проектных подходов и технологических решений. Представленный анализ направлен на выявление наиболее перспективных путей преодоления инженерных противоречий и служит основой для дальнейших исследований в области синтеза нового поколения тепловизионной оптики.

#### *Список литературы*

1. Попов А.В. Расчетная модель оптической системы для одноканального двухспектрального приемника архитектуры электронно-оптического преобразователя // Известия вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 5. С. 613-623.
2. Парфёнова Т. В., Хацевич Т. Н. Двухдиапазонные объективы для инфракрасной области спектра // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2011. Т. 5. № 1. С. 71-74.
3. Парфёнова Т.В., Хацевич Т.Н. Оптические системы для двух тепловизионных диапазонов // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2014. Т. 5. № 1. С. 26-31.

Д.Г. ДЕНИСОВ

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

## **МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЕФЕКТОВ ЧИСТОТЫ ПОЛИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ ДИАГНОСТИКИ РАССЕЯННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Задача идентификации на оптических деталях одновременного присутствия как поверхностных неоднородностей в виде остаточной шероховатости с высотным параметром не более  $R_z 0,05$ , так и остаточных дефектов чистоты в виде царапин, точек, шлифованных пузырей и выколок является важной для контроля технологического процесса изготовления деталей и в последствие оказывающих влияние на изображение в оптико-электронных системах, обеспечивающих высокое разрешение оптического изображения при минимальном уровне остаточного светорассеяния. Полученные теоретические и экспериментальные результаты могут быть использованы для исследования дефектов чистоты полированных поверхностей оптических деталей, для определения наличия царапин, исследования шероховатости в зонах светового размера в производственных условиях.

D.G. DENISOV

*Bauman Moscow State Technical University*

## **THE IDENTIFICATION METHOD OF PURITY DEFECTS OF POLISHED SURFACES OPTICAL DETAILS BASED ON DIAGNOSTICS OF DIFFRACTED LASER EMISSIONS**

The task of identifying on optical parts the simultaneous presence of both surface inhomogeneities in the form of residual roughness with a height parameter of no more than  $R_z 0.05$ , and residual purity defects in the form of scratches, dots, sanded bubbles and gouges is important for controlling the manufacturing process of parts and subsequently affecting the image in optoelectronic systems that ensure high optical image resolution with minimal residual light scattering. The theoretical and experimental results obtained can be used to study defects in the purity of polished surfaces of optical parts, to determine the presence of scratches, and to study roughness in areas of light size in industrial conditions.

В современном оптическом приборостроении особый научно-технический интерес представляют бездефектные оптические поверхности для широкого класса применения при создании оптико-электронных приборов и систем построения изображения, включая изделия астрономической, космической и лазерной оптики. Такого класса детали характеризуются высоким качеством поверхности, определяемым соотношением среднеквадратического значения шероховатостей



поверхностей, составляющих от одного и до десятых долей нанометра с рабочей длиной волны оптического (и в частности, лазерного) излучения. Пространственно-частотный диапазон поверхностных неоднородностей для таких уровней шероховатостей расширяется до  $100 \text{ нм}^{-1}$  и более. Однако, помимо остаточной шероховатости поверхностей ответственных деталей как правило одновременно присутствуют и такие дефекты чистоты поверхностей как царапины, наличие которых ухудшает эксплуатационные характеристики изделий, ограничивают качественное нанесение оптических покрытий и понижают оптические характеристики. В зависимости от количества и размера дефектов ГОСТ 11141 устанавливает 14 классов чистоты полированной поверхности. Согласно данному стандарту для деталей, находящихся в плоскостях действительного изображения оптической системы или в плоскости предметов, установлено три нулевых класса чистоты: для поверхностей, визуально анализируемых измерительным микроскопом с фокусным расстоянием окуляра 10, 20 и 40 мм соответственно. Разработанный метод предусматривает построение индикатрисы рассеяния лазерного излучения [1 - 4] как функции от углов падения  $\theta_0$  и углов дифракции  $\theta$ , (различающихся при исследовании остаточной шероховатости и поверхностных дефектов в виде царапин), азимутального угла и геометро-оптического фактора в виде безразмерной функции  $F_{ij}$ , учитывающей состояние поляризации рассеянного лазерного излучения. Учёт состояния поляризации в уравнениях процесса рассеяния лазерного излучения даёт отличительный признак для идентификации поверхностных дефектов в виде царапин по характерным графическим распределениям зарегистрированной индикатрисы рассеянного лазерного излучения, имеющей характерные «провалы» для углов дифракции (рассеяния), либо  $\vec{S}_p$  (либо  $\vec{P}_p$ ) – компонент плоской линейно-поляризованной волны.

#### Список литературы

1. Денисов Д.Г. // Прикладная физика. 2022. № 1. С. 89-96.
2. Денисов Д.Г., Барышников Н.В., Карасик В.Е., Сазонкин С.Г., Машошин Д.А., Животовский И.В. Система для определения параметров ангстремного уровня шероховатости и поверхностных неоднородностей контролируемой оптической поверхности. Патент на изобретение RU 2844921 C1, 11.08.2025. Заявка № 2024137283 от 11.12.2024.
3. Денисов Д.Г., Карасик В.Е., Барышников Н.В., Машошин Д.А., Патрикеев В.Е., Тамбовский А.Д., Кудрявцев А.В., Кудиков В.Н. Способ идентификации дефектов чистоты полированных поверхностей оптических деталей. Патент на изобретение RU 2846410 C1, 05.09.2025. Заявка № 2025100669 от 14.01.2025.
4. Денисов Д.Г., Барышников Н.В., Животовский И.В., Карасик В.Е., Сахаров А.А., Патрикеева А.А. Способ определения среднеквадратического отклонения шероховатости оптической поверхности. Патент на изобретение RU 2823018 C1, 17.07.2024. Заявка № 2023131460 от 30.11.2023.

А.П. СЕМЕНОВ<sup>1</sup>, О.Е. РУДНЕВ<sup>1</sup>, А.В. КУДРЯВЦЕВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Лыткаринский завод оптического стекла

<sup>2</sup>Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

## **ИЗГОТОВЛЕНИЕ ГЛАВНОГО ЗЕРКАЛА ИК-ОБЪЕКТИВА ИЗ СПЕЧЁННОГО БЕЗ ДАВЛЕНИЯ КАРБИДА КРЕМНИЯ**

Описан технологический процесс изготовления крупногабаритного асферического зеркала из спечённого без давления карбида кремния (SSiC), входящего в состав ИК-объектива. Приведены результаты интерферометрического контроля

A.P. SEMENOV<sup>1</sup>, O.E. RUDNEV<sup>1</sup>, A.V. KUDRYAVCEV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Lytkarino Optical Glass Factory

<sup>2</sup>Moscow State University of Technology «STANKIN»

## **MANUFACTURE OF THE MAIN MIRROR OF AN IR LENS FROM PRESSURE-FREE SINTERED SILICON CARBIDE**

The technological process of manufacturing a large-sized aspherical mirror made of pressure-free sintered silicon carbide (SSiC), which is part of an IR lens, is described. The results of interferometric control are presented.

Спечённый без давления карбид кремния (Sintered Silicon carbide) уникальным сочетанием физико-механических характеристик, позволяющих создавать принципиально новые конструкции крупногабаритной оптики, включая не только оптические зеркала, но и элементы конструкции, что позволяет создавать термостабилизированные системы, работающие в условиях криогенных и контрастных температур и динамических нагрузок [1].

Жёсткость SSiC превосходит традиционные для оптической промышленности материалы в 3 - 5 раз, что позволяет производить сверхоблегченные зеркала, масса которых в несколько раз меньше, чем, например, зеркала из астроситалла. Наряду с этим, материал демонстрирует феноменальную теплопроводность, которая выше в 100 раз, и высокую устойчивость к температурным колебаниям. Благодаря способности сохранять свои свойства при экстремальном нагреве до 1600 °C, он надежно работает в самых суровых условиях.

На первом этапе технологического процесса подготавливается гранулят из мелкодисперсного порошка SiC, формальдегидной смолы и

катализаторов спекания. Далее производится холодное изостатическое прессование гранулята при давлении до 150 - 200 МПа.

Получаемая прессованная заготовка устанавливается во фрезерный обрабатывающий центр, где закладываются основные габаритные размеры, черновая форма рабочей поверхности, ячейки структуры облегчения. Затем заготовка спекается при температуре свыше 2000 °К, последовательно в атмосфере азота и аргона. На этапе спекания заготовка приобретает окончательные физико-механические характеристики.

Из-за высокой твёрдости (9,5 по шкале Мооса) дальнейшая обработка поверхности производится связанным алмазным инструментом и алмазными суспензиями [2].

Финишная обработка формы поверхности производится программно-управляемым методом [3]. Контроль формы поверхности проводится интерференционным способом с применением дифракционного оптического элемента. На рис. 1 представлен внешний вид изготовленной детали диаметром 660 мм (а), топографическая карта отклонения формы поверхности (б).

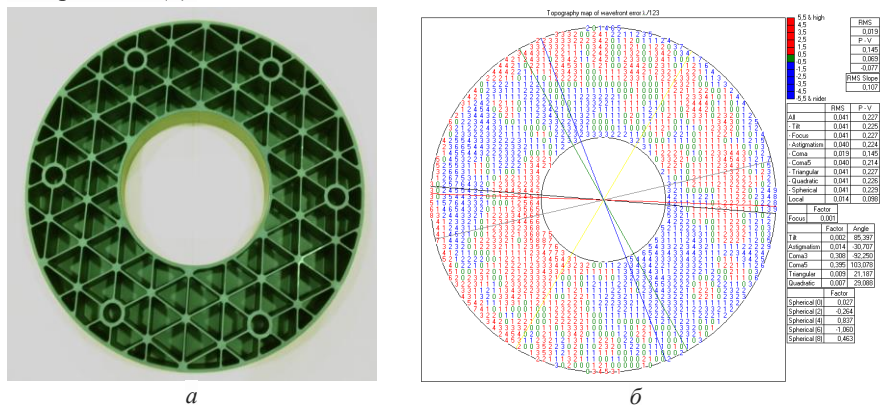


Рис. 1. Внешний вид изготовленной детали диаметром 660 мм (а), топографическая карта отклонения формы поверхности RMS = 0,018; PV = 0,145 (б)

#### Список литературы

1. Абдулкадыров М.А., Архипов С.А., Денисов Д.Г. и др. // Сборник научных трудов по материалам докладов XXVIII Международной конференции. Дубна. Т. 28. С. 165-171.
2. Семенов А.П., Абдулкадыров М.А., Тамбовский А.Д. и др. // Международная научно-техническая конференция. Москва: МИРЭА, 2024. С. 29-35.
3. Семенов А.П., Абдулкадыров М.А., Игнатов А.Н. и др. // Контенант. 2024. Т. 23. № 2. С. 40-62.
4. Семенов А.П., Патрикеев В.Е., Тамбовский А.Д. и др. Патент РФ № 2803879С1.

Г.В. СОЛОПОВ, Ю.О ПРОСОВСКИЙ, О.Ф. ПРОСОВСКИЙ,  
А.Н. ИСАМОВ, В.А. СМОЛ'ЯНИНОВ

*Обнинское научно-производственное предприятие «Технология» им. А.Г. Ромашина*

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ПОСЛЕ ОПЕРАТИВНОГО РЕМОНТА МИШЕНИ МАГНЕТРОНА В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ**

В работе приведён сравнительный анализ спектральных характеристик оптических покрытий до и после оперативного ремонта мишени магнетрона. Проведена оценка эффективности проведённого ремонта.

G.V. SOLOPOV, Yu.O. PROSOVSKIY, O.F. PROSOVSKIY,  
A.N. ISAMOV, V.A. SMOL'YANINOV

*Obninsk Research and Production Enterprise Technologiya, Kaluga Region*

## **COMPARATIVE ANALYSIS OF OPTICAL COATINGS AFTER OPERATIVE REPAIR OF THE TARGET MAGNETRON IN LABORATORY CONDITIONS**

The comparative analysis of the spectral characteristics of the optical coatings before and after the operative repair of the magnetron target is shown. The effectiveness of the repair was evaluated.

На сегодняшний день оптические покрытия играют ключевую роль в современной оптической промышленности Российской Федерации. Они широко применяются во многих сферах, таких как: наука, здравоохранение, безопасность, транспорт, оборонная промышленность. Столь обширный охват большого количества сфер приводит к широкой номенклатуре производимых оптических покрытий [1, 2]. При этом, есть установленные сроки производства оптических покрытий, поэтому крайне важно обеспечить их своевременное выполнение. В то же время, возникают проблемы износа оборудования или технологических источников, задействованных в нанесении покрытия. Поэтому необходимо обеспечить оперативный ремонт вышедшего из строя оборудования (по возможности) без задействования сторонней организации, что существенно сократит время ремонта.

Таким образом, цель работы – провести сравнительный анализ оптических покрытий, полученных до и после оперативного ремонта мишени магнетрона для оценки эффективности проведённого ремонта.

Для проверки эффективности проведённого оперативного ремонта мишени магнетрона в работе приведён сравнительный анализ спектральных характеристик, полученных интерференционных оптических покрытий, а также представлены их физические и оптические параметры. На рис. 1 представлены результаты изменения нанесённых оптических покрытий на спектрофотометре Agilent Cary 300 в видимом диапазоне.

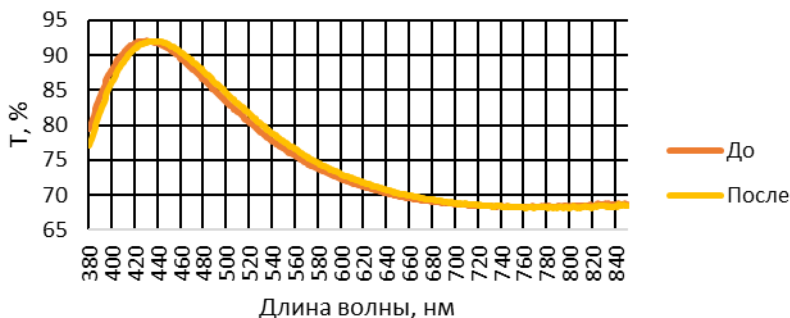


Рис. 1. Спектральные характеристики оптических покрытий до и после оперативного ремонта

Из рис. 1 следует – в результате оперативного ремонта мишени магнетрона спектральные характеристики не изменились. Что означает следующее: характеристики мишени после её замены практически не изменились.

Таким образом проведённый сравнительный анализ оптических покрытий показал, что оперативный ремонт мишени магнетрона может быть успешно выполнен в лабораторных условиях в кратчайшие сроки.

#### Список литературы

1. Просовский Ю.О., Просовский О.Ф., Буднев А.Ю., Денисов Д.Г., Барышников Н.В., Современная система прямого оптического широкополосного контроля толщины напыляемых оптических покрытий // Светотехника. 2020. № 4. С. 51-54.
2. Просовский Ю.О., Просовский О.Ф., Буднев А.Ю., Исамов А.Н., Смолянинов В.А. Технология получения сложных многослойных интерференционных покрытий // Труды 29-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Вакуумная техника и технологии – 2022». Санкт-Петербург, 2022. С. 253-258,

Д.А. МАШОШИН, Д.Г. ДЕНИСОВ

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

**ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКИХ  
ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ ДИАГНОСТИКИ  
РАСSEЯННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
С УЧЁТОМ СОСТОЯНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ**

Приведены экспериментальные данные по измерению поля рассеянного излучения от подложек из карбида кремния и результаты восстановления среднеквадратического отклонения их рабочей поверхности. Представлен экспериментальный макет, на котором производились измерения, и представлена погрешность измерений.

D.A. MASHOSHIN, D.G. DENISOV

*Bauman Moscow State Technical University*

**RESEARCH OF THE QUALITY OF OPTICAL SURFACES  
OF PARTS BASED ON DIAGNOSTICS OF LASER RADIATION  
SCATTERING TAKING INTO ACCOUNT  
THE POLARIZATION STATE**

Experimental data on the measurement of the scattered radiation field from silicon carbide substrates and the results of the reconstruction of the standard deviation of their working surface are presented. An experimental setup on which the measurements were performed is presented, and the measurement error is presented.

Требования к шероховатости поверхности в областях астрооптики и силовой оптики достигают единиц нанометра, что в современных реалиях является вызовом как для технологов, так и для аппаратуры контроля. Одним из методов, способных производить измерения шероховатости на уровне единиц ангстрем, является метод дифференциального рассеяния [1 - 3]. Метод представляет из себя подсветку контролируемой поверхности лазерным излучением и регистрацию рассеянного излучения в некотором диапазоне углов, который связан с областью пространственных частот дифракционным соотношением.

Целью работы является экспериментальное исследование поля рассеянного излучения от подложек карбида кремния и восстановления шероховатости поверхности по зарегистрированным данным.

Для регистрации рассеянного излучения был разработан экспериментальный стенд, представленный на рис. 1. Макет представляет собой роботизированный комплекс, в котором один робот с закреплённым на нём модулем подсветки отвечает за геометрию подсвета поверхности, а второй – за сканирование поля рассеянного излучения модулем фоторегистрации, закреплённым на нём.

В качестве образцов были взяты три подложки из карбида кремния номиналом шероховатости 0,52, 0,50 и 0,60 нм соответственно (далее образцы № 1, № 2 и № 3 соответственно). Для регистрации поля рассеянного излучения был выбран угол подсвета 60 градусов, шаг сканирования 0,1 градуса, диапазон углов сканирования рассчитан под пространственно-частотный диапазон 30 - 200 мм<sup>-1</sup>, соответствующие размеру неоднородностей единицы и доли нанометров. Длины волн подсвета составляли 405, 520 и 638 нм. Результаты измерений приведены в таблице 1.

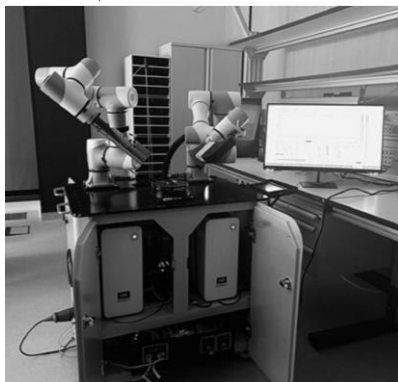


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Таблица 1. Результаты измерений

| № | Длина волны, нм | Частоты, 1/мм | СКО, нм |
|---|-----------------|---------------|---------|
| 1 | 520             | 30 - 200      | 0,54    |
| 1 | 638             | 30 - 200      | 0,54    |
| 1 | 405             | 30 - 200      | 0,49    |
| 2 | 520             | 30 - 200      | 0,49    |
| 2 | 638             | 30 - 200      | 0,52    |
| 2 | 405             | 30 - 200      | 0,36    |
| 3 | 520             | 30 - 200      | 0,57    |
| 3 | 638             | 30 - 200      | 0,61    |
| 3 | 405             | 30 - 200      | 0,42    |

#### Список литературы

1. Schröder S., et al. // Applied Optics. 2010. V. 50 (9). P. 164-171.
2. Church E.L., Jenkinson H.A., Zavada J.M.// Optical Engineering. 1979. V. 18 (2). P. 125-136.
3. Youngworth R.N., Gallagher B.B., Stamper B.L. // Optical manufacturing and testing VI. 2005. V. 5869. P. 206-216.

Д.П. ВИЛЬЧИНСКИЙ<sup>1</sup>, Ю.В. МУХИН<sup>1,2</sup>, Н.Д. КУНДИКОВА<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Южно-Уральский государственный университет, Челябинск

<sup>2</sup>Институт электрофизики Уральского отделения РАН, Екатеринбург

## ОПТИКО-ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТОНКИХ АНИЗОТРОПНЫХ ПЛЁНОК

В данной работе получены формулы амплитудных коэффициентов отражения для тонких анизотропных плёнок. Предложен метод определения их параметров посредством эллипсометрических измерений.

D.P. VILCHINSKIY<sup>1</sup>, Yu.V. MUKHIN<sup>1,2</sup>, N.D. KUNDIKOVA<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>South Ural State University, Chelyabinsk

<sup>2</sup>Institute of Electrophysics of Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg

## OPTICAL POLARIZATION METHOD OF DETERMINING PARAMETERS OF THIN ANISOTROPIC FILMS

In this paper, the Fresnel formulae are modified for thin anisotropic films. Ellipsometric method of determining parameters of thin anisotropic films is suggested.

Определение параметров анизотропных плёнок оптическими методами крайне затруднено наличием кросс-тока между  $s$ - и  $p$ -поляризациями на границах раздела [1]. В случае одноосных плёнок этого можно избежать, добиваясь развязки между поляризациями, например, если оптическая ось ориентирована параллельно плоскости падения. В этом случае  $s$ - и  $p$ -поляризации отражаются независимо, а в плёнке распространяются как обыкновенная и необыкновенная волны соответственно. На этом и основан предлагаемый в работе метод. Некоторые эллипсометрические установки позволяют измерять  $r_s$  и  $r_p$  независимо. Тогда можно установить плоскость падения, содержащую оптическую ось по экстремумам  $r_s$  и  $r_p$ . Измеренные в такой конфигурации зависимости эллипсометрических параметров от угла падения и позволят определить параметры плёнки, включая её толщину и ориентацию оптической оси. Формула Френеля для  $p$ -поляризации на границе «воздух-плёнка» выглядит тогда следующим образом:

$$r_p = \frac{n_o \sqrt{n_e^2 - n_o^2 \sin^2 \theta} - \varepsilon_{\Phi\Phi} \cos \theta}{n_o \sqrt{n_e^2 - n_o^2 \sin^2 \theta} + \varepsilon_{\Phi\Phi} \cos \theta};$$



$$n_e^2 = \varepsilon_{\parallel} \left( 1 - \frac{(\varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp}) \left( n_0 \sin \theta \cos \gamma \frac{\varepsilon_{\perp}}{\varepsilon_{\parallel}} + \sin \gamma \sqrt{\varepsilon_{\perp} \left( \sin^2 \gamma + \frac{\varepsilon_{\perp}}{\varepsilon_{\parallel}} \cos^2 \gamma \right) - \frac{\varepsilon_{\perp}}{\varepsilon_{\parallel}} n_0^2 \sin^2 \theta} \right)}{\varepsilon_{\parallel} \varepsilon_{\perp}} \right) \frac{1}{\left( \sin^2 \gamma + \frac{\varepsilon_{\perp}}{\varepsilon_{\parallel}} \cos^2 \gamma \right)} \right);$$

$$\varepsilon_{\Phi\Phi} = \varepsilon_{\parallel} \left\{ 1 + \sin \gamma \left( \sin \gamma + \frac{n_0 \sin \theta \cos \gamma}{\sqrt{n_e^2 - n_0^2 \sin^2 \theta}} \right) \frac{(\varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp})}{\varepsilon_{\perp}} \right\}^{-1}.$$

В этих выражениях:  $\theta$  – угол падения,  $\gamma$  – угол между оптической осью и границей раздела,  $n_0$  – коэффициент преломления воздуха. Нами так же впервые получены выражения для амплитудных коэффициентов отражения от тонких плёнок. Формула для  $p$ -поляризации (система «воздух-плёнка-подложка») имеет вид:

$$r_p = \frac{r_{01} + (t_{01}t_{10} - r_{01}r_{10})r_{12}e^{i\delta}}{1 - r_{10}r_{12}e^{i\delta}}.$$

Здесь  $r_{01}$  не равен  $-r_{10}$ , угол падения не равен углу отражения, а  $\delta$  – сумма набега фаз волн в плёнке в разных направлениях. Нами в качестве примера рассмотрены плёнки оксидхлорида ниобия (IV) [2]. Для разных толщин таких плёнок ( $d = 22, 24, 27, 30$  мкм), на рис. 1 и 2 приведены расчёты коэффициентов отражения для  $p$ -поляризации.

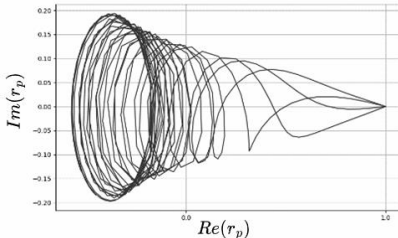


Рис. 1. Зависимость мнимой и действительной части  $r_p$

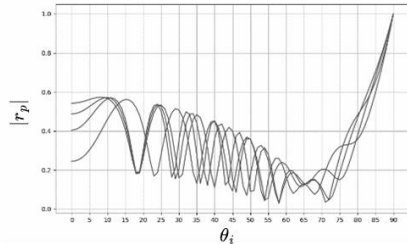


Рис. 2. Модуль коэффициента отражения от угла для  $p$ -поляризации

В заключение, в данной работе впервые получены формулы Френеля для тонких прозрачных одноосных плёнок. Предложен оптико-поляризационный метод определения параметров анизотропных плёнок. Предложенный метод может применяться в реальном времени для контроля роста или нанесения тонких анизотропных плёнок.

#### Список литературы

1. Мухин Ю.В., Гатаулина Ю.Р., Кундикова Н.Д. Поляризационные эффекты при отражении света от границы одноосного кристалла // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2023. Т. 15. № 2. С. 66-72.
2. Guo Q., et al. Colossal in-plane optical anisotropy in a two-dimensional van der Waals crystal // Nature Photonics. 2024. V. 18. No. 11. P. 1170-1175.

И.Е. РЫКОВ<sup>1</sup>, М.В. МАЙТАМА<sup>1</sup>, Д.А. БЕЛОВ<sup>1,2</sup>,  
А.В. ИКОННИКОВ<sup>1,2</sup>, Р.А. ХАБИБУЛЛИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

<sup>2</sup>Московский государственный университет

## **ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВ РАСХОДИМОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕРАГЕРЦОВЫХ КВАНТОВО-КАСКАДНЫХ ЛАЗЕРОВ С ДВОЙНЫМ МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ВОЛНОВОДОМ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ВТОРЫХ МОМЕНТОВ**

Приведены результаты расчёта углов расходимости излучения терагерцовых (ТГц) квантово-каскадных лазеров (ККЛ) с рабочими частотами 2, 3.75 и 4 ТГц путём применения метода вторых моментов. Проведено сравнение полученных значений с более традиционным способом вычисления через полную ширину на полувысоте (FWHM).

I.E. RYKOV<sup>1</sup>, M.V. MAYTAMA<sup>1</sup>, D.A. BELOV<sup>1,2</sup>,  
A.V. IKONNIKOV<sup>1,2</sup>, R.A. KHABIBULLIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University

## **MEASUREMENT OF BEAM DIVERGENCE ANGLES OF TERAHERTZ QUANTUM CASCADE LASERS WITH DOUBLE-METAL WAVEGUIDES BASED ON THE METHOD OF SECOND ORDER MOMENTS**

We present the results of calculating the beam divergence angles of terahertz (THz) quantum cascade lasers (QCL) with operating frequencies of 2, 3.75 and 4 THz by utilizing the method of second order moments. The obtained values are compared with the more traditional method of evaluation by the full width at half maximum (FWHM).

Терагерцовые квантово-каскадные лазеры (ТГц ККЛ) являются перспективными источниками излучения в данном диапазоне для применения в высокоразрешающей спектроскопии и визуализации в режиме реального времени. Одним из требований для этих приложений является малая расходимость излучения. В данной работе предлагается использовать метод вторых моментов [1, 2] для определения углов расходимости излучения нескольких образцов ТГц ККЛ с двойным

металлическим волноводом и сравнить его с традиционным способом  $\theta = \tan^{-1} \text{FWHM}/L$  [3].

Измерения были проведены для ККЛ с частотами 2, 3.75 и 4 ТГц. Рис. 1 демонстрирует измеренное с помощью ячейки Голя распределение интенсивности в плоскости, нормальной оптической оси, а рис. 2 – зависимость квадратов диаметров пучка от координаты вдоль оптической оси.

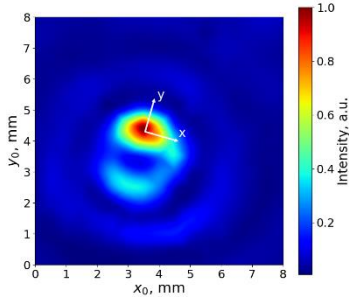


Рис. 1. Нормированное распределение интенсивности излучения одного из образцов ККЛ в вертикальном сечении

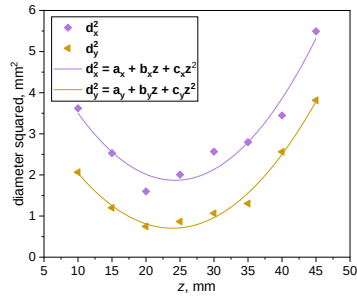


Рис. 2. Зависимость квадратов диаметров пучка от координаты вдоль оптической оси и аппроксимационные параболы

Коэффициенты аппроксимации дают следующие значения полных углов расходимости вдоль главных направлений  $x, y$  (рис. 1):  $\theta_x = (c_x)^{1/2} 180^\circ/\pi = 5,1^\circ$ ,  $\theta_y = 4,76^\circ$ . В то же время результат конвенционального расчёта через отношение  $d/L$ , как хорошо иллюстрирует рис. 1(б), зависит от текущей координаты и приводит к следующим значениям для положения перетяжки  $z \approx 20$  мм:  $\theta_x = 2^\circ$ ,  $\theta_y = 1,3^\circ$ . Сравнение показывает, что величины углов отличаются более чем в два раза для различных методов, причём очевидный способ дает заниженные значения.

#### Список литературы

1. Nemes G., Siegmann A.E. // J. Opt. Soc. Am. A. 1994. V. 11 (8). P. 2257-2264.
2. ГОСТ Р ИСО 11146-1-2008. Часть 1. «Стигматические (гомоцентрические) и слабоастигматические пучки».
3. Jin Y., Gao L., Chen J., et al. // Nature Commun. 2018. V. 9 (1). P. 1-7.

М.М. ЯКОВЛЕНКО<sup>1,2</sup>, И.В. ОБРОНОВ<sup>2</sup>, Н.Н. ЕВТИХИЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

<sup>2</sup>ООО «ВПГ Лазеруан», Фрязино

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ Yb:YAG ВОЛНОВОДНОГО УСИЛИТЕЛЯ ПРИ НАКАЧКЕ 1007 нм**

Разработана численная модель для моделирования усиления пучка в Yb:YAG волноводе, которая учитывает неоднородность среды, генерацию ASE, повышение температуры в усилителе и зависимость поперечных сечений от длины волны и температуры. На основе этого была создана геометрия волновода. Была продемонстрирована возможность получения выходной мощности 1100 Вт и качество пучка  $M2 = 3,6$  при эффективности усиления 55 %.

М.М. IAKOVLENKO<sup>1,2</sup>, I.V. OBRONOV<sup>2</sup>, N.N. EVTIKHIEV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

<sup>2</sup>LLC «VPG Lazerone», Fryazino

## **NUMERICAL MODELING OF Yb:YAG WAVEGUIDE AMPLIFIER PUMPED AT 1007 nm**

A numerical model has been developed for simulation of a beam amplification in a Yb:YAG waveguide, which takes into account the non-uniformity of the medium, ASE generation, temperature increase in amplifier, and the cross sections dependence on wavelength and temperature. The waveguide geometry has been created based on it. The possibility to obtain an output power 1100 W and a beam quality 3.6 with optical-to-optical efficiency 55 % has been demonstrated.

Легированный волновод – это четвёртый тип лазерных усилителей, помимо волоконных, дисковых и слэб. Он сочетает в себе преимущества волоконных и дисковых усилителей и позволяет получить высокую эффективность усиления и качество пучка. Кроме того, материал может эффективно охлаждаться благодаря небольшой толщине образца, как в случае с тонкими дисками. В то же время в них отсутствуют недостатки волоконных усилителей (в волокнах существуют ограничения на пиковую мощность и на достижение высоких энергий импульсов) и дисковых усилителей (они требуют большого количества проходов пучка через среду, что делает систему чувствительной к образованию тепловых линз). Недавнее исследование показало достижение авторами средней мощности 7 кВт при эффективности усиления 68 % [1]. Таким образом, волноводные

усилители являются одними из наиболее перспективных типов для дальнейших исследований.

В настоящей работе исследуется эффективность усиления и качество пучка волновода Yb:YAG с использованием разработанной численной модели. Общий вид моделируемого усилителя показан на рис. 1. Принцип работы волновода заключается в изменении показателя преломления YAG после легирования ионами Yb [2]. Длина волны накачки составляет 1007 нм, качество пучка составляет  $M^2 = 7$ . Средняя входная мощность сигнального пучка составляет 100 Вт,  $M^2 = 1$  и длина волны 1030 нм. Оба пучка распространяются от переднего торца волновода в жиле, представляющей собой Yb:YAG.

Результаты численного моделирования демонстрируют эффективность усиления 55 % (рис. 2а). При использовании накачки мощностью 2 кВт возможно достичь мощности 1.1 кВт. Тем не менее, при усилении происходит ухудшение качества пучка вдоль O<sub>x</sub> (рис. 2б). Выходная мощность 1.1 кВт соответствует значению  $M^2 \approx 3,6$  вдоль оси O<sub>x</sub>. Анализ схемы показал, что причиной такого эффекта является образование тепловой линзы.

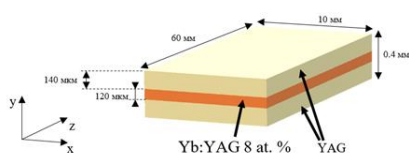


Рис. 1. Моделируемый волноводный усилитель на Yb:YAG

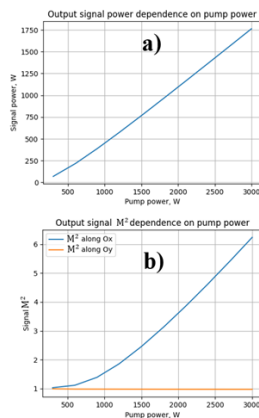


Рис. 2. Результаты численного моделирования

#### Список литературы

1. Qu B., et al. Symmetrical corner-pumped planar waveguide laser amplifier // IEEE Journal of Quantum Electronics. 2021. V. 57. No. 5. P. 1-8.
2. Patel F.D., et al. Laser demonstration of Yb/sub 3/Al/sub 5/O/sub 12/(YbAG) and materials properties of highly doped Yb: YAG // IEEE Journal of Quantum Electronics. 2002. V. 37. No. 1. P. 135-144.

М.А. СТЕПАНОВ<sup>1</sup>, Н.В. МИТЕТЕЛО<sup>1</sup>, С.Д. ЛАВРОВ<sup>1</sup>,  
А.П. ПЯТАКОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОГО МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ОБЛАСТИ МАГНИТНЫХ ДОМЕННЫХ ГРАНИЦ МЕТОДОМ НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ**

В данной работе представлены результаты исследования микромагнитной структуру доменных границ в плёнке феррит-граната, обладающего выраженным магнитоэлектрическим взаимодействием, при помощи микроскопии второй оптической гармоники с разрешением по поляризации. Получены карты распределения намагниченности в области магнитных границ, определён их тип и электрическая поляризация.

М.А. STEPANOV<sup>1</sup>, N.V. MITETELO<sup>1</sup>, S.D. LAVROV<sup>1</sup>,  
A.P. PYATAKOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>MIREA – Russian Technological University, Moscow

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University

## **INVESTIGATION OF LOCAL MAGNETOELECTRIC INTERACTION IN THE REGION OF MAGNETIC DOMAIN WALLS BY NONLINEAR-OPTICAL MICROSCOPY**

This work presents the results of a study of the micromagnetic structure of domain walls in the iron-garnet film exhibiting magnetoelectric interaction, carried out by means of second-harmonic generation microscopy with polarization resolution. Magnetization distribution maps in the region of magnetic domain boundaries have been obtained, and the wall type and its electric polarization have been determined.

Магнитоэлектрическое взаимодействие в плёнках феррит-гранатов представляет значительный интерес благодаря возможности управления магнитным порядком при помощи электрического поля [1]. Однако микромагнитная структура доменных границ и индуцируемая ими электрическая поляризация остаются недостаточно изученными, поскольку такие объекты крайне чувствительны к внешним магнитным и электрическим полям, а также к механической деформации. В результате лишь ограниченное число экспериментальных методов позволяет

исследовать доменные стенки, не внося существенного искажения в их конфигурацию [2]. В этом контексте оправдано использование микроскопии излучения второй оптической гармоники, обладающей как чувствительностью к кристаллической симметрии и магнитной подсистеме, так и возможностью неинвазивного картирования [3].

В данной работе исследуются особенности структуры магнитных доменных границ в плёнке  $(\text{BiLu})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$  класса симметрии  $m$ , выращенной эпитаксиальным способом на подложке галлий-гадолинийграната с кристаллографической ориентацией (210).

Использование различных комбинаций поляризаций накачки и регистрируемого излучения в методе микроскопии второй оптической гармоники позволило определить условия возникновения магнитооптического контраста между доменами и доменными стенками и получить их высококонтрастные изображения. Анализ поляризационных зависимостей излучения второй гармоники в области доменной границы дал возможность выделить вклад отдельной компоненты вектора намагниченности в формирование магнитооптического контраста. Это, в свою очередь, позволило восстановить из экспериментальных данных двумерные карты распределения намагниченности в области магнитных доменных границ и определить их тип.

На основе сопоставления экспериментальных данных с модельными представлениями о магнитоэлектрическом взаимодействии в феррит-гранатах было также получено распределение электрической поляризации, индуцируемой в областях с неоднородной намагниченностью вблизи доменных границ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 24-72-10116.

#### *Список литературы*

1. Pyatakov A.P., Sergeev A.S., et al. // Physics-Uspekhi, 2015, V. 58 (10), P. 981.
2. Arzamastseva G.V., Balbashov A.M., et al. // JETP, 2015. V. 120 (4). P. 687-701.
3. Maydykovskiy A., Temiryazeva M., et al. // Applied Sciences. 2023. V. 13 (15), P. 8828.

В.В. СМІРНОВ<sup>1,2</sup>, А.Б. ПОГОЖЕВА<sup>1</sup>, О.М. АЛЫКОВА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Астраханский государственный университет им. В.Н. Татищева*

<sup>2</sup>*Каспийский институт морского и речного транспорта им. генерал-адмирала  
Ф.М. Апраксина – филиал ФГБОУ ВО «ВГУВТ», Астрахань*

## **УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО КАНАЛА СВЯЗИ**

Приведено описание простой бюджетной установки для изучения лазерного канала связи и влияния на качество связи погодных условий. Установка позволяет продемонстрировать передачу видеосигнала, и провести количественные измерения при передаче по каналу сигналов специальной формы (меандр, треугольник и другие сигналы).

V.V. SMIRNOV<sup>1,2</sup>, A.B. POGZHEVA<sup>1</sup>, O.M. ALYKOVA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*V.N. Tatishchev Astrakhan State University*

<sup>2</sup>*The Caspian Institute of Marine and River Transport named after Admiral  
F.M. Apraksin – branch of the FSBEI HE «VGUVT», Astrakhan*

## **INSTALLATION FOR STUDYING THE LASER COMMUNICATION CHANNEL**

A simple budget installation is described for studying the laser communication channel and the impact of weather conditions on the quality of communication. The installation allows you to demonstrate the transmission of a video signal, and to carry out quantitative measurements when transmitting signals of a special shape (meander, triangle, et cetera) over the channel.

На пленарном заседании XVII Международной конференции «Физика в системе современного образования» (ФССО–2023), отмечалось падение интереса школьников к предмету, не готовность учителей использовать современные методические подходы [1], что является следствием архаичного содержания образования. Создание мотивирующей образовательной экспериментальной деятельности школьников – один из способов решения этой проблемы. Внесение в программу физики современных технологий, связанных с высокотехнологичными гаджетами, может стать основой такой мотивации.

Одним из таких гаджетов может стать лазер и технические системы, построенные на его основе, например, линия лазерной связи, которые получают распространение как в космосе, так и для ближней связи на



Земле. Промышленность производит наборы, предназначенные для изучения применения лазера в качестве системы передачи аудио- и видеосигналов. Однако стоимость такого набора является запредельной как для подавляющего большинства школ, так и для вузов [2].

Поэтому целью работы является создание простой бюджетной установки лазерной связи, и разработка системы экспериментов, позволяющих изучить особенности использования лазерного канала связи, а также влияние на него погодных условий.

Установка позволяет продемонстрировать передачу как видеосигнала (рис. 1), так и импульсных сигналов. Демонстрация передачи видеосигнала позволяет достичь «вау-эффекта» – перекрывая луч, школьники убеждаются, что передача информации осуществляется действительно по нему, а не по какому-то скрытому проводу. Использование видеокамеры усиливает эффект – на экране наблюдаются непосредственные участники происходящего.



Рис. 1. Демонстрация передачи видеосигнала



Рис. 2. Внешний вид установки для демонстрации лазерного канала связи

Количественные измерения проводятся с использованием гармонического генератора, или генератора сигналов специальной формы. Амплитуда передаваемого и принимаемого сигналов измеряется с помощью двухканального осциллографа.

Пластиковая труба, расположенная по центру установки (рис. 2), через которую распространяется луч лазера, в сочетании с дымашинной (на рис. 2 показана справа), предназначена для изучения влияния погодных условий (туман, дождь) на работу лазерного канала связи. Показан момент исчезновения сигнала при плотном тумане.

#### *Список литературы*

1. Гольцман Г.Н., Чулкова Г.М., Адамский А.И. Новая физика – система общего образования на основе экспериментальной деятельности учащихся с максимальным использованием высоких технологий // Материалы XVII Международной конференции ФССО-2023. СПб: Из-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2023. С. 12-20.
2. Набор «Лазерная связь» <https://denar-prof.ru/products/4713> (Дата обращения 1.11.2024 г.).

А.С. СУШКО, Д.Г. ДЕНИСОВ

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

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА  
ДЕТЕКТИРОВАНИЯ МОЛЕКУЛЯРНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ  
НА ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЕВОЙ ПОДЛОЖКИ  
С НАНЕСЁННЫМ ПОКРЫТИЕМ**

Обоснована необходимость создания математического описания процесса детектирования молекулярного загрязнения на поверхности кремниевой подложки с нанесённым покрытием. Выявлены основные параметры, влияющие на мощность измеряемого сигнала потока рассеянного частиц излучения.

A.S. SUSHKO, D.G. DENISOV

*Bauman Moscow State Technical University*

**MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE DETECTION  
OF MOLECULAR CONTAMINATION ON THE SURFACE  
OF A COATED SILICON WAFER**

The necessity of creating a mathematical description of the detection process of molecular contamination on the surface of a coated silicon wafer is substantiated. The main parameters influencing the power of the measured signal of the particle-scattered radiation flux are revealed.

В современной микроэлектронике кремниевые подложки являются фундаментом для производства интегральных схем, фотоприёмников и других высокотехнологичных компонентов. Чистота поверхности подложки становится критическим фактором, определяющим качество изготовления конечной продукции, поскольку наличие молекулярных загрязнений на поверхности кремниевой пластины может иметь крайне негативное воздействие на результаты последующих технологических процессов. Таким образом, обнаружение и идентификация молекулярных загрязнений на поверхности кремниевой подложки является важным технологическим процессом.

В источнике исследования [1] приведено описание разрабатываемого оригинального прибора контроля чистоты и качества изготовления поверхностей кремниевых подложек, основанный на детектировании излучения, рассеянного молекулярными загрязнениями и поверхностными дефектами. Описываемая установка производит сканирование по

спиралевидной траектории и регистрирует поток рассеянного излучения в приближении теории рассеяния Ми [2, 3].

Наиболее подробно математическое описание процесса рассеяния излучения на молекулярных загрязнениях представлено в источнике исследования [4]. В данном источнике исследования представлен процесс рассеяния излучения круглой частицей, располагающейся на поверхности кремниевой пластины. Однако, для изготовления многих компонентов микроэлектроники необходимо заблаговременно нанести диэлектрическое покрытие определённой толщины на поверхность кремниевой пластины. В основном в качестве покрытий используются такие материалы, как оксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ) и нитрид кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ).

В работе представлен подход к описанию процесса рассеяния оптического излучения с учётом тонкослойной диэлектрической плёнки.

Данное математическое описание основано на явлении двулучевой интерференции в тонких плёнках [5, 6] и обладает зависимостью от угла падения излучения  $\theta$ , толщины покрытия  $h$ , а также от показателей преломления покрытия  $n_c$  и подложки  $n_w$ . Сначала рассчитывается разность фаз между двумя лучами, отраженными разными границами сред, затем рассчитываются коэффициенты отражения и пропускания на границах сред, после чего происходит расчёт результирующей интенсивности.

Таким образом, разработанное и предложенное математическое описание, учитывающее толщину наносимого диэлектрической плёнки, является важным и актуальным.

#### *Список литературы*

1. Барышников Н.В., Денисов Д.Г., Машошин Д.А. и др. Сравнительный анализ современных методов контроля качества кремниевых пластин для изготовления изделий микроэлектроники // Контенант. 2025. Т. 24. № 1. С. 25-45.
2. Bohren C.F., Huffman D.R. Absorption and Scattering of Light by Small Particles. New York, A Wiley-Interscience publication, John Wiley & Sons. 1986.
3. Козырев В.Д. Моделирование индикатрис рассеяния продуктов горения для математической модели оптического сигнализатора дыма // Студенческая научная весна: Всероссийская студенческая конференция: сборник тезисов докладов, Москва, 01–30 апреля 2021 года. М.: Издательский дом "Научная библиотека", 2021. С. 199-200.
4. Сушко А.С. Математическое описание и моделирование рассеянного частицами излучения // Контенант. 2025. Т. 24. № 1. С. 12-24.
5. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. 2-е изд., испр. М.: Наука, 1973.
6. Просовский О.Ф., Буднев А.Ю., Денисов Д.Г., Барышников Н.В., Просовский Ю.О. // Современная система прямого оптического широкополосного контроля толщины напыляемых оптических покрытий // Светотехника. 2020. № 4. С. 51-54.

**В.И. ПАВЛОВ, А.Ф. КУРЧАНОВ, Н.П. ХАТЫРЕВ**

*Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических  
и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская обл.*

**ВЛИЯНИЕ ГРАДИЕНТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
НА ПАРАМЕТРЫ РЕЗОНАНСА КОГЕРЕНТНОГО  
ПЛЕНЕНИЯ НАСЕЛЁННОСТИ  
В ЦЕЗИЕВОЙ АТОМНОЙ ЯЧЕЙКЕ**

Представлены результаты исследования влияния градиента магнитного поля на параметры резонанса когерентного пленения населённости (КПН) в ячейке с парами  $^{133}\text{Cs}$ . Рассмотрены перспективы применения разработанной модели для создания высокостабильных компактных стандартов частоты.

**V.I. PAVLOV, A.F. KURCHANOV, N.P. KHATYREV**

*Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering,  
Mendeleevo, Moscow region*

**INFLUENCE OF MAGNETIC FIELD GRADIENT  
ON COHERENT POPULATION TRAPPING RESONANCE  
PARAMETERS IN CESIUM ATOMIC CELL**

The results of a study of the influence of magnetic field gradient on coherent population trapping (CPT) resonance parameters in a cell with  $^{133}\text{Cs}$  vapor are presented. The prospects for the application of the developed model for the creation of highly stable compact frequency standards are considered.

Исследования влияния градиента магнитного поля на параметры резонанса когерентного пленения населённости в цезиевых атомных часах представляют собой критически важное направление для создания высокостабильных стандартов частоты [1]. Ключевыми преимуществами подхода являются возможность точного контроля уширения резонансной линии и минимизации вклада магнитной неоднородности в нестабильность часов [2]. Разработана модель магнитного поля, учитывающая основные геометрические параметры системы: число витков (10), ток через витки (0.25 А), расстояние между катушками (7 мм). Модель позволяет анализировать распределение поля вдоль оси системы и оценивать градиенты в рабочем объёме цезиевой ячейки (рис. 1).

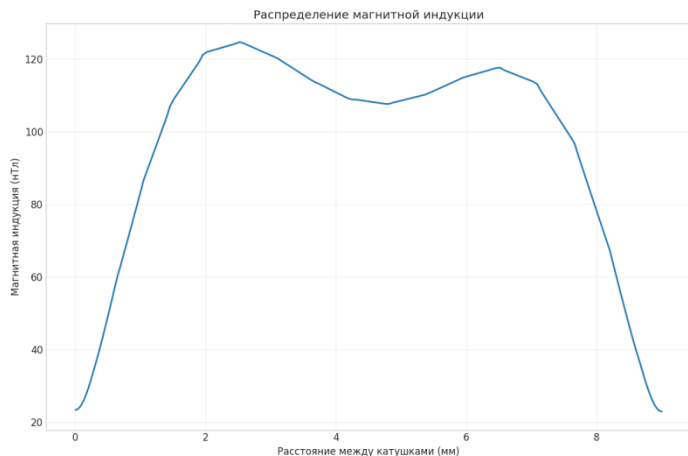


Рис. 1. Распределение магнитного поля вдоль оси системы катушек, по вертикальной оси – магнитное поле (нТл), по горизонтальной – положение (мм)

В ходе моделирования установлено, что система катушек Гельмгольца (2 катушки, 10 витков, ток 0.25 А/виток, расстояние 7 мм) обеспечивает высокую однородность магнитного поля в рабочем объёме цезиевой ячейки. Показано, что градиент поля не превышает 2.8 нТл/см при основном поле 23 нТл. Модель демонстрирует относительную неоднородность поля 0.87 % в области  $\pm 4.5$  мм от центра. Подтверждена возможность достижения стабильности атомных часов на уровне  $10^{-13}$  при использовании данной конфигурации катушек. Разработанный подход позволяет создавать компактные и стабильные цезиевые атомные часы и магнетометры для задач навигации, связи и фундаментальных исследований.

#### Список литературы

1. Зотов Е.А., Парехин Д.А. Исследование метрологических характеристик сверхминиатюрного квантового стандарта частоты // Альманах современной метрологии. 2020. № 3 (23). С. 128-136.
2. Малах М.П. Зависимость магниточувствительных резонансов в стандартах частоты на КПН-эффекте от величины внешнего магнитного поля // Альманах современной метрологии. 2021. № 4 (28). С. 115-118.

Д.А. ПОЛЕТАЕВ, Б.В. СОКОЛЕНКО, И.А. БУГАСОВ  
*Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь*

## **КОНЦЕПЦИЯ КВАНТОВОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЯ НА ТОНКИХ ПЛЁНКАХ**

В работе последовательно излагается концепция построения квантового вычислителя (квантового компьютера), применяющего тонкие плёнки. Выдвигается гипотеза о возможности простой реализации по вводу-выводу данных.

D.A. POLETAEV, B.V. SOKOLENKO, I.A. BUGASOV  
*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol*

## **THE CONCEPT OF A THIN-FILM QUANTUM COMPUTER**

This paper outlines the concept of building a quantum computer using thin films. A hypothesis is put forward regarding the possibility of a simple implementation for data input and output.

Современная наука активно применяет термин «квантовый компьютер». Однако не все исследуемые и даже предлагаемые к реализации устройства данного класса можно отнести к компьютерам, в плане осуществления квантовых вычислений [1]. Вместе с тем, независимо от названий и функциональности, данные приборы требуют сложных систем охлаждения и ввода-вывода информации [2].

Низкая температура функционирования квантовой системы снижает уровень шумов, что делает прибор более стабильным в плане результатов. Квантовые шумы – естественные помехи, возникающие при работе систем такого рода. Ввод-вывод информации из квантовых систем сопряжён со следующими вопросами: изменение состояния диагностируемой системы и необходимость введения пробного зонда. Сложности работы квантовых вычислителей также сопряжены со сложностями получения усреднённого (среднестатистического) результата, привычного для неквантовых систем [2]. Работы, связанные с учётом и компенсацией влияния данных особенностей весьма актуальны.

В работе предлагается концепция квантового вычислителя, построенного с применением тонких плёнок для уменьшения квантовых шумов и упрощения аппаратуры ввода-вывода информации.

Целью работы является предложение и анализ возможностей реализации квантового вычислителя на тонких плёнках.

Предлагаемая модель содержит: тонкую плёнку (размеры и материалы весьма вариативны), устройства для ввода информации, устройства для вывода информации. При этом тонкоплёночная структура имеет кластеры. Данные кластеры рассматриваются отдельными элементами вычислителя. При этом передача информации от элемента к элементу (в модели от кубита к кубиту) реализуется аналогично системе с зарядовой связью – на вход плёночной структуре подаются данные для вычислений, а с выхода снимаются. Кроме того, можно предложить методику ввода информации в виде фотонов, электронов, отдельных атомов. При режиме ввода отдельных атомов плёночная структура может деградировать, что компенсируется её заменой через определённый временной период функционирования.

Устройства для ввода информации могут выступать лазерами. Устройства вывода – квантовыми интерферометрами.

Критическая оценка предлагаемой модели может быть проведена по критерию применимости и реализуемости. Действительно, моделирование предлагаемой структуры – весьма трудоёмко, как в виде компьютерных затрат, так и в плане квантовых вычислений, так как предварительно для предлагаемой структуры должны быть просчитаны варианты взаимодействия кластеров и передачи информации. Это может потребовать стороннего квантового вычислителя для предварительной оценки параметров. Кроме того, требуется экранировать описываемую плёночную структуру от внешних воздействий.

*Список литературы*

1. Barenco A., Bennett C.H., Cleve R. et al. // Phys. Rev. A. 1995. V. 52. No. 5. P. 3457-3467.
2. Guzik V., Guzik V., Gushanskiy S., et al. // 5th Computer Science On-line Conference 2016 (CSOS). 2016. P. 59-68.

**П.Ц. ЛЮЙ, Д.Г. ДЕНИСОВ, А.В. КУДРЯШОВ<sup>1</sup>**

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

*<sup>1</sup>Институт динамики геосфер им. М.А. Садовского РАН, Москва*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ МЕТОДА АПЕРТУРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ**

Приведены экспериментальные данные принципов работы метода апертурного зондирования и проанализированы практически значимые результаты, полученные на лабораторном стенде с учётом его особенностей и конфигурации построения.

**P.Ts. LIUI, D.G. DENISOV, A.V. KUDRIASHOV<sup>1</sup>**

*Bauman Moscow State Technical University*

*<sup>1</sup>Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of the RAS, Moscow*

## **THE INVESTIGATION OF THE OPERATION FEATURES OF THE APERTURE PROBE METHOD IN LABORATORY CONDITIONS**

Experimental data on the principles of the aperture sensing method are presented and practically significant results obtained on a laboratory stand are analyzed, taking into account its features and configuration of construction..

На основе проработанных источников исследования отечественных и зарубежных авторов, специализирующихся в области создания адаптивных оптико-электронных систем, была предложена оригинальная схема построения метода апертурного зондирования для анализа и последующего оптического разрешения мелкоструктурных объектов. Отличительной особенностью предлагаемого метода и аппаратуры на его основе является возможность визуализации объектов исследования и отработки возникающих искажений регистрируемого волнового фронта, отражённого от объектов исследования, непосредственно по анализу их видеоизображений.

Как известно регистрация мелкоструктурных объектов через слой оптической атмосферы может быть затруднена вследствие существующих неоднородностей в атмосфере, переносимых ламинарными или турбулентными воздушными потоками воздушных масс. Существующие на сегодняшний день и представленные в источниках исследования методы адаптивной оптики, основаны на аппаратной реализации методов





Е.Ю. ЛЕТОВА, Т.В. ИВАНОВА, Д.С. ЗАВГОРОДНИЙ<sup>1</sup>

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

*<sup>1</sup>АО «ЛОМО», Санкт-Петербург*

## **КОРРЕКЦИЯ КОНЕЧНОГО РАЗМЕРА ТОЧЕЧНОГО ТЕСТ-ОБЪЕКТА МЕТОДОМ ИНВЕРСНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ФУНКЦИИ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭНЕРГИИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕННОМ КОНТРОЛЕ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

В работе рассмотрен метод коррекции конечного размера точечных тест-объектов методом инверсной фильтрации с применением линейной интерполяции функции передачи модуляции для последующего вычисления функции концентрации энергии. В том числе показан способ последующей обработки скорректированной функции рассеяния точки, позволяющий снизить абсолютное значение погрешности вычисления функции концентрации энергии до 0,01 отн. ед. по сравнению с референтными значениями для моделированных данных. Также определены границы применимости предложенного метода, то есть максимальные размеры используемых тест-объектов, через соотношение диаметра диафрагмы и дифракционного диаметра пятна рассеяния.

E. Yu. LETOVA, T. V. IVANOVA, D. S. ZAVGORODNIY<sup>1</sup>

*<sup>1</sup>ITMO University, Saint Petersburg*

*<sup>2</sup>JSC LOMO, Saint-Petersburg*

## **POINT TEST OBJECT FINITE SIZE CORRECTION USING THE INVERSE FILTERING METHOD FOR THE ENCIRCLED ENERGY FUNCTION CALCULATION IN FABRICATION TESTING OF OPTICAL SYSTEMS**

The paper considers a pinhole test object finite size correction method using inverse filtering with the modulation transfer function linear interpolation for the following encircled energy function calculation. A post-processing method for the corrected point spread function, which reduces the absolute value of the encircled energy function calculation error to 0.01 relative units compared to the reference values for the modeled data, is also shown. Moreover, the applicability limits of the proposed method are determined, which are the maximum sizes of the used test objects, through the ratio of the aperture diameter and the diffraction diameter of the scattering spot.

В настоящее время одним из распространённых методов оценки качества оптических систем является контроль по функции концентрации

энергии (ФКЭ) [1, 2]. Как известно для правильного вычисления ФКЭ необходимо зарегистрировать изображение тест-объекта, диаметр которого можно считать бесконечно малым, то есть в 10 раз меньше дифракционного диаметра пятна рассеяния в пространстве диафрагмы [1, 2]. В случае если нет возможности сделать измерения с подходящим диаметром диафрагмы, ФКЭ, вычисленная по изображению тест-объекта большего размера, будет содержать значительную погрешность. Поэтому в работе предложен метод коррекции конечного размера точечных тест-объектов методом инверсной фильтрации [3, 4] с применением линейной интерполяции функции передачи модуляции (ФПМ) для последующего вычисления ФКЭ.

Для учёта размера предмета при вычислении ФКЭ сперва нужно скомпенсировать функцию рассеяния точки (ФРТ), используемую для расчёта концентрации энергии. ФРТ с учётом размера можно получить обратным преобразованием Фурье скомпенсированной ФПМ. Линейная интерполяция ФПМ устраняет разрывы функции в областях деления на значения близкие к нулю, но не точно повторяет форму кривой, поскольку ФПМ нелинейна, из-за чего на скорректированной ФРТ появляются артефакты в виде высокочастотного шума. Для его устранения предложено использовать медианную фильтрацию и метод многократного устранения фона [3, 4] для скорректированной ФРТ, позволяющие снизить абсолютное значение погрешности вычисления ФКЭ до 0,01 отн. ед. по сравнению с референтными значениями для моделированных данных.

Также определены границы применимости предложенного метода инверсной фильтрации с использованием интерполяции для вычисления ФКЭ. Когда необходимо корректировать весь спектр пространственных частот, максимальный размер используемых диафрагм должен быть в 1,23 раза меньше дифракционного диаметра пятна рассеяния, что в 8 раз больше, чем размер бесконечно малой диафрагмы.

Таким образом, рассмотренный метод инверсной фильтрации с дополнительной линейной интерполяцией сечений ФПМ и последующей обработкой скорректированной ФРТ для учёта конечного размера предмета при вычислении ФКЭ, позволяет компенсировать достаточно большие размеры тест-объектов, без существенного увеличения погрешности вычислений.

#### *Список литературы*

1. Drygin D.A., Ostrun A.B., // J. Opt. Technol. 2020. V.87, P. 506-512
2. Andersen T.B. // Applied Optics. 2015. V.54. №25. P. 7525.
3. Letova E.Yu., Ivanova T.V., Zavgorodniy D.S. // J. Opt. Technol. 2025. V. 92 (6). P. 970107.
4. Letova E.Yu., Ivanova T.V., Zavgorodniy D.S. // Proc. of XIV ICPIO. 2025. P. 623-624.

Р.С. ЧЕТВЕРИН, М.И. ШАРИПОВА, А.А. ФЕДЯНИН  
*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

**ИЗМЕРЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ  
ФОТОРЕЗИСТА В МИКРОСТРУКТУРАХ,  
ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ ДВУХФОТОННОЙ  
ЛАЗЕРНОЙ ЛИТОГРАФИИ**

В работе измерялась спектральная зависимость показателя преломления фоторезиста SZ-2080, полимеризованного в процессе изготовления микроструктур методом двухфотонной литографии, для чего были изготовлены микроразмерные аксиконы.

R.S. CHETVERIN, M.I. SHARIPOVA, A.A. FEDYANIN  
*Lomonosov Moscow State University*

**MEASUREMENT OF THE REFRACTIVE INDEX  
OF PHOTORESIN USED IN TWO-PHOTON LASER  
LITHOGRAPHY FOR MANUFACTURING MICROSIZED  
OPTICAL ELEMENTS**

In this study, the refractive index SZ-2080 photoresist has been measured for visible wavelengths, using micro-sized axicons fabricated using two-photon lithography.

При изготовлении оптических элементов важно знать показатель преломления материала, однако приводимые в литературе значения для фоторезистов, используемых в двухфотонной литографии, например, фоторезиста SZ-2080, сильно варьируются [1, 2]. Кроме того, при изготовлении методом двухфотонной лазерной литографии показатель преломления полученных микроструктур зависит от множества факторов: используемой мощности лазерного излучения, скорости движения лазерной перетяжки и других параметров печати. Для того чтобы точно знать показатель преломления изготавливаемой структуры, необходимо измерить его для конкретной комбинации параметров печати.

Для решения задачи определения показателя преломления фоторезиста в микроструктурах были изготовлены аксиконы – осесимметричные линзы конической формы. При прохождении света через аксикон формируется кольцо с центром на оптической оси аксикона, причём радиус кольца  $r$  зависит от расстояния между аксиконом и кольцом  $L$

следующим образом:  $r \approx L \operatorname{tg}((n-1)\alpha)$ , где  $n$  – показатель преломления,  $\alpha$  – угол при основании аксикона. В случае когерентного излучения с диаметром пучка больше диаметра основания аксикона, при расстояниях  $L$ , на которых радиус кольца больше радиуса аксикона, кольцо будет интерферировать с падающим пучком (рис. 1). Период интерференции  $d$  описывается формулой  $d = \lambda / \sin \theta$ , где  $\lambda$  – длина волны падающего света,  $\theta$  – угол преломленного аксиконом луча, однозначно связанный с  $n$  и  $\alpha$  через закон Снеллиуса.

Аксиконы радиусом 50 мкм и углом при основании  $\alpha = 15^\circ$  изготавливались методом двухфотонной литографии из фоторезиста SZ-2080 при следующих параметрах печати: мощность лазерного излучения 2 мВт, скорость движения перетяжки 1000 мкм/с, расстояние между линиями 0.2 мкм.

Показатель преломления изготовленных структур определялся как по зависимости радиуса формируемого кольца от расстояния вдоль оптической оси, так и по периоду интерференционной картины. Измерения проводились с использованием лазерного источника суперконтинуума в диапазоне от 525 до 775 нм.

Было выявлено, что напечатанный аксикон имеет наклон около  $2^\circ$  относительно подложки, из-за чего формируемое кольцо становится эллиптическим. С этим может быть связано завышенное значение показателя преломления при определении по радиусам колец. Также это привело к тому, что период интерференции различен в разных точках картины. При определении показателя преломления по периоду интерференции этот эффект был учтен. Полученные зависимости приведены на рис. 2.

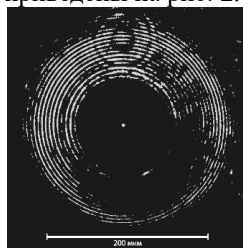


Рис. 1. Фотография интерференционной картины от аксикона

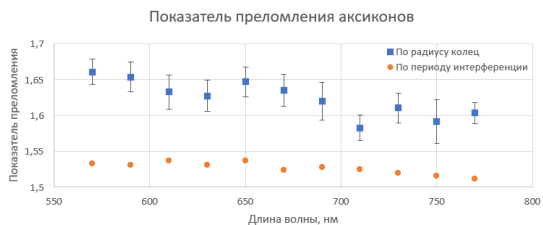


Рис. 2. Измеренная зависимость показателя преломления от длины волны

#### Список литературы

1. Žukauskas A., et al. // Optical Materials. 2015. V. 39. P. 224-231.
2. Gonzalez-Hernandez D., et al. // Adv. Optical Mater. 2023. V. 11.

Н.Н. БАЛАН<sup>1,2</sup>, А.А. ВАСИН<sup>1,2</sup>, В.В. ИВАНОВ<sup>1</sup>, Е.В. СОКОЛОВА<sup>1</sup>,  
А.Л. ПАНКРАТОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт молекулярной электроники, Зеленоград

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

## **ОЦЕНКА ДОПУСКОВ НА РАЗМЕРЫ ЭЛЕМЕНТОВ РИСУНКА НА ФОТОШАБЛОНЕ ДЛЯ ПРОЕКЦИОННОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ ВБЛИЗИ ПРЕДЕЛА ЛИНЕЙНОГО РАЗРЕШЕНИЯ**

В работе демонстрируется метод, позволяющий оценить требуемые значения допусков на размеры элементов рисунка на фотошаблоне (Range, МТТ и линейность L) путём построения для указанных величин компромиссных зависимостей, возникающих при работе вблизи предела линейного разрешения литографического процесса.

N.N. BALAN<sup>1,2</sup>, A.A. VASIN<sup>1,2</sup>, V.V. IVANOV<sup>1</sup>, E.V. SOKOLOVA<sup>1</sup>,  
A.L. PANKRATOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Molecular Electronics Research Institute, Zelenograd

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),  
Dolgoprudny

## **THE ESTIMATION OF MASK CD MTT, RANGE AND LINEARITY FOR PROJECTION LITHOGRAPHY NEAR THE LINEAR RESOLUTION LIMIT**

In this work we describe mask CD MTT, Range and Linearity estimation method for projection lithography near the linear resolution limit.

Стремительный рост возможностей электронной техники происходит в значительной мере за счёт совершенствования инструментария проекционной фотолитографии [1, 2], важной частью которого является фотошаблон (ФШ), представляющий собой кварцевую плоскопараллельную пластину, покрытую маскирующим слоем, в котором сформирован рисунок одного или нескольких литографических слоёв производимой интегральной схемы (ИС), переносимый в слой фоторезиста на пластине посредством оптической проекции в ультрафиолетовом излучении.

Необходимость коррекции эффектов оптической близости (дифракционных искажений формируемого изображения) возникает при работе вблизи так называемого "предела линейного разрешения", то есть точки, в которой зависимость пропечатываемого на пластине размера от размера элемента на фотошаблоне перестает быть линейной для однотипных фигур рис. 1 [3]. При приближении к этой точке резко возрастает значение фактора усиления ошибки на ФШ (MEEF), которое, в отличие от величины предела линейного разрешения, не снижается в процессе проводимой коррекции, что, очевидно, ужесточает требования к качеству рисунка на ФШ.

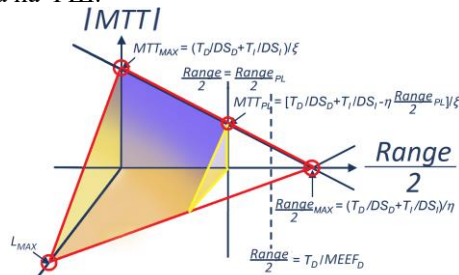


Рис. 1. Компромисс  $|MTT| - Range / 2 - L$

В настоящей работе демонстрируется метод, позволяющий оценить возможные значения таких параметров качества изображения на ФШ, как однородность размера ( $Range$ ), отстояние среднего от номинала ( $MTT$ ) и линейность рисунка ( $L$ ) [4] путём построения для указанных величин компромиссных зависимостей [5] подобных изображенной на рис. 1, неизбежно возникающих при работе вблизи предела линейного разрешения литографического процесса.

#### Список литературы

1. Красников Г.Я., Горнев Е.С., Матюшкин И.В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 2. Вопросы метода и классификации // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника. 2017. № 4 (168). Р. 16-41.
2. Красников Г.Я., Зайцев Н.А. Нанoeлектроника: состояние, проблемы и перспективы развития // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 1 (102). Р. 2-5.
3. Mack C.A. Fundamental principles of optical lithography: the science of microfabrication. John Wiley & Sons, 2007.
4. SIA Website The International Technology Roadmap for Semiconductors. Lithography. 2001 - 2013 Revisions. URL: <https://www.semiconductors.org/?s=itrs>, 2020.
5. Lee S.-W., Leunissen L.H.A., et al. Analysis method to determine and characterize the mask mean-to-target and uniformity specification // 22nd European Mask and Lithography Conference / Proc. SPIE, 2006. V. 6281. P. 62810U.

П.О. КАЛУГИН

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва*

## **СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В КЛАССИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ДИФРАКЦИИ**

Представлены два способа моделирования оптической системы используя классическую скалярную теорию дифракции, а конкретнее, фурье-метод моделирования функции рассеяния точки, и метод углового спектра, приведены преимущества и недостатки данных методов при моделировании.

P.O. KALUGIN

*National Research University MPEI (Moscow Power Engineering Institute)*

## **COMPARISON OF METHODS FOR MODELING OPTICAL SYSTEMS IN CLASSICAL DIFFRACTION THEORY**

Two methods of modeling an optical system using the classical scalar theory of diffraction, more specifically, the Fourier method of modeling the point spread function, and the angular spectrum method are presented, and the advantages and disadvantages of these methods in modeling are given.

При моделировании оптической системы способами из скалярной теории дифракции задача заключается в следующем – необходимо заменить оптическую систему эквивалентным оптическим элементом, например тонкой линзой, а также определить диаметр выходного зрачка, также обусловимся, что при моделировании оптической системы, используя скалярный подход в дифракции, будет производиться замена оптической системы на идеальную, а в идеальной оптической системе выходной зрачок равен входному. Диаметр выходного зрачка, в этом случае, рассматривается как апертурная диафрагма, а тонкая линза учитывается в расчётах как фазовый множитель.

Далее рассмотрим особенности моделирования оптической системы фурье-методом и методом углового спектра. Системы автоматизированного проектирования, такие как Zemax [1], используют фурье-метод моделирования для получения функции рассеяния точки (ФРТ) оптической системы. К преимуществам можно отнести относительно низкую вычислительную стоимость и простоту реализации. К недостаткам метода можно отнести что он не подходит для систем с высокой числовой апертурой ( $N > 1$ ).



Далее рассмотрим метод углового спектра. Данный метод подходит для большинства оптических систем с невысокой числовой апертурой, для оптических систем с высокой числовой апертурой,  $NA > 1$ , данный метод не подойдет поскольку преобразование Фурье дает большую погрешность [2]. К преимуществам метода углового спектра можно отнести, что в отличие от метода Фурье, проще моделировать ФРТ на произвольном расстоянии [3].

Было проведено моделирование оптической системы «Индустар-50» Фурье методом и методом углового спектра. В результате моделирование было получены ФРТ в фокальной плоскости линзы и было проведено сравнение с Zemax. Параметры оптической системы: числовая апертура  $NA = 0,143034$ ,  $f' = 52,4391$  мм,  $D/f' = 3,459728$ . На рис. 1 и 2 представлены результаты моделирования.

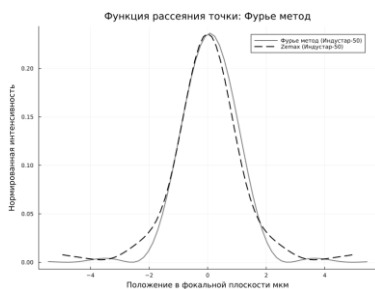


Рис. 1. Моделирование ФРТ  
фурье-методом

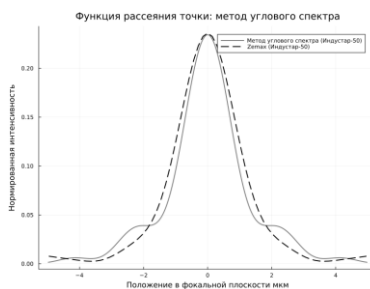


Рис. 2. Моделирование ФРТ методом  
углового спектра

#### Список литературы

1. Ansys Zemax OpticStudio User Guide [Online Resource]. Ansys, Inc. 2025. URL: <https://ansyshelp.ansys.com/> (accessed 05.04.2025).
2. Engelberg Y.M., Ruschin S., et al. // Journal of the Optical Society of America A. 2004. V. 21 (11). P. 2135-2145.
3. Lyakin D.V., Ryabukho V.P. Local angular spectrum of a perturbation of a monochromatic wave field // Optics and Spectroscopy. 2024. V. 132 (12). P. 1197-1207.

А.В. КОРОБКОВА, Н.А. МАКАРЕНКОВА

*Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)*

## **МОНИТОРИНГ ДЕФОРМАЦИЙ НА ОСНОВЕ БРЭГГОВСКИХ РЕШЁТОК**

Разработана волоконно-оптическая система мониторинга деформаций элементов планера летательного аппарата. В системе в качестве чувствительных элементов датчиков используются волоконные брэгговские решётки. Приведены функциональная схема измерительного преобразователя, алгоритм работы и результаты математического моделирования. Показана возможность создания многоканальной сенсорной сети измерения деформации с высокой помехозащищённостью.

A.V. KOROBKOVA, N.A. MAKARENKOVA

*Moscow Aviation Institute (National Research University)*

## **STRAIN MONITORING BASED ON BRAGG GRATINGS**

A system for monitoring airframe structural strain has been developed. The system uses fiber Bragg gratings as sensing elements. The functional diagram of a measurement transducer, operation algorithms and modeling results are presented. The possibility of creating a multi-channel sensor network with high noise immunity is shown.

Волоконно-оптические брэгговские решётки (ВБР) являются перспективными чувствительными элементами для мониторинга состояния конструкций летательных аппаратов [1]. ВБР осуществляют периодическую модуляцию показателя преломления в сердцевине оптического волокна и функционируют как узкополосные отражательные фильтры. Длина волны отражения  $\lambda_B$  зависит от периода решётки  $\Lambda$  и эффективного показателя преломления  $n_{\text{eff}}$ :  $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$ . При деформации период решётки  $\Lambda$  и эффективный показатель преломления  $n_{\text{eff}}$  изменяются, вызывая сдвиг длины волны отражения  $\lambda_B$  [2]. Разработанная система мониторинга включает волоконно-оптический измерительный преобразователь (рис. 1), состоящий из частотно-перестраиваемого лазера, направленного ответвителя, многокомпонентного волоконно-оптического датчика, реализованного на основе набора волоконно-чувствительных элементов ВБР, приёмника оптического излучения, масштабного усилителя, аналого-цифрового преобразователя, микроконтроллера и других компонентов.



Рис. 1. Функциональная схема преобразователя

Алгоритм работы преобразователя включает этапы инициализации, самодиагностики, калибровки и измерительного цикла. Для проверки целостности сенсорной сети применяется метод OTDR. Для анализа характеристик ВБР использован матричный метод [3]. Проведено моделирование спектра отражения однородной ВБР. Исследовано влияние амплитуды модуляции показателя преломления на спектральные характеристики. Увеличение  $\Delta n_{ac}$  приводит к росту коэффициента отражения и увеличению ширины спектра. Для многоканальных систем актуально использование неоднородных ВБР. Промоделирован спектр отражения неоднородной ВБР из трёх решёток. Проблема боковых лепестков решается использованием аподизации. Моделирование показало, что гауссов профиль позволяет снизить уровень боковых лепестков с  $\sim 20$  до  $\sim 2\%$ . Чувствительность ВБР к деформации характеризуется коэффициентом тензочувствительности  $\sim 1.2$  пм/мкε при  $\lambda_B = 1550$  нм. Моделирование подтвердило линейную зависимость сдвига длины волны отражения  $\lambda_B$  от деформации. Разработанная система обладает высокой точностью и надёжностью. На её основе имеется возможность создания многоканальной сенсорной сети измерения деформации с высокой помехозащищённостью.

#### Список литературы

1. Kashyap R. Fiber Bragg Gratings. Academic Press, 1999.
2. Erdogan T. Fiber grating spectra // J. Lightwave Technol. 1997. V. 15. No. 8. P. 1277-1294.
3. Бугров В.Н. и др. Анализ узкополосных фильтров на брэгговских решетках // Физика волновых процессов. 2010. Т. 13, № 4. С. 29-34.

Б.В. СОКОЛЕНКО, Н.В. ЛЯХОВИЧ, Д.А. ПОЛЕТАЕВ,  
Ю.А. ЕГОРОВ

*Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь*

## **ДИФРАКЦИОННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ СИНГУЛЯРНЫХ ПУЧКОВ НА ФАЗОВЫХ НЕОДНОРОДНОСТЯХ ОТРАЖАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

Продemonстрированы результаты численного моделирования процесса дифракции пучков со спиральным волновым фронтом на фазовом элементе, имитирующем отражение от шероховатой поверхности с разной высотой и поперечными размерами неоднородностей.

B.V. SOKOLENKO, N.V. LYAKHOVICH, D.A. POLETAEV,  
Yu.A. EGOROV

*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol*

## **DIFFRACTION EVOLUTION OF SINGULAR BEAMS ON PHASE INHOMOGENEITIES OF REFLECTING SURFACES**

The results of numerical simulation of the diffraction process of beams with a spiral wavefront on a phase element simulating reflection from a rough surface with different heights and transverse dimensions of inhomogeneities are demonstrated.

Современные тенденции в области высокоточной обработки материалов, микроэлектроники и биомедицины демонстрируют острую необходимость разработки новых методов диагностики с высокой чувствительностью, разрешением и минимизацией погрешности. При этом особое внимание уделяется бесконтактным неразрушающим методам анализа, основанным на взаимодействии световых пучков с исследуемыми образцами [1]. Для этих целей актуально применение сингулярных пучков, имеющих винтовую форму волнового фронта, что удобно для регистрации изменений амплитуды и фазы поля, вызванных воздействием, например, со стороны поверхностных неоднородностей [2]. Однако одним из препятствий на пути применения оптических вихрей следует признать сложность определения их фазовых характеристик с достаточной точностью, что обычно связано со структурными искажениями интенсивности сингулярных пучков из-за дифракции [3]. Цель настоящей работы заключалась в моделировании дифракционной эволюции

сингулярных пучков на фазовых неоднородностях отражающих поверхностей и определении параметров, при которых вихревой пучок восстанавливает кольцевое распределение амплитуды и фазовый профиль.

На рис. 1 представлен результат численного моделирования отражения вихревого лазерного пучка ( $\lambda = 0,633$  мкм) с топологическим зарядом  $l = 1$  от микрорельефной поверхности с привлечением скалярной теории дифракции и численных методов интегрирования.

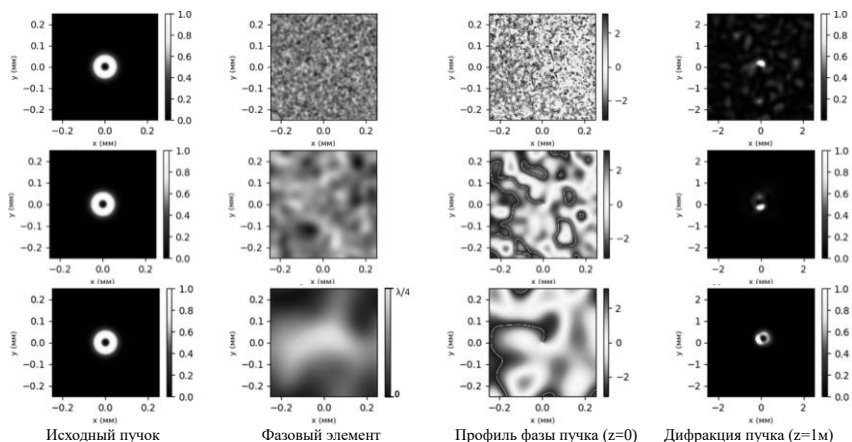


Рис. 1. Картины распределения амплитуды сингулярного пучка, отражённого от поверхности с максимальной высотой рельефа  $\lambda/4$  и поперечным шагом неоднородностей 6, 30 и 60 мкм

Полученные результаты демонстрируют постепенное восстановление распределения интенсивности пучка по мере увеличения поперечного размера неоднородностей. Заметим, даже в случае разности фаз парциальных лучей вплоть до  $\pi/2$ , что наиболее деструктивно влияет на структуру дифрагированного пучка (первый ряд), при достижении масштаба неоднородностей сравнимого с радиусом пучка в плоскости поверхности ( $\omega_0 = 50$  мкм) в дальней зоне дифракции характерное распределение амплитуды пучка в виде «пончика» восстанавливается.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Проект № 24-12-20013).

#### Список литературы

1. Hughes H., Leane M., et al. // AAPS PharmSciTech. 2023. V. 24. P. 209-211.
2. Cheng M., Jiang W., et al. // Light Sci Appl. 2025.V. 14. P. 4-6.
3. Петров Н.В., Павлов П.В., Малов А.Н. // Квант. эл. 2013. Т. 43 (6). С. 582-587.

А.В. КУДРЯВЦЕВ<sup>1,2</sup>, В.И. ТЕЛЕШЕВСКИЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Лыткаринский завод оптического стекла

<sup>2</sup>Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕТОДОМ СПЕКТРАЛЬНОГО СИНТЕЗА**

Представлен метод моделирования шероховатых поверхностей с заданными статистическими характеристиками. Метод позволяет генерировать поверхности с нормальным распределением высот микронеровностей, с помощью обратного Фурье преобразования функции спектральной плотности мощности.

A.V. KUDRYAVCEV<sup>1,2</sup>, V.I. TELESHEVSKIY<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Lytkarino Optical Glass Factory

<sup>2</sup>Moscow State University of Technology «STANKIN»

## **MODELING OF ROUGH SURFACES BY SPECTRAL SYNTHESIS METHOD**

A method for modeling rough surfaces with specified statistical characteristics is presented. The method makes it possible to generate surfaces with a normal height distribution of micro-dimensions using the inverse Fourier transform of the power spectral density function.

Поверхность формируется путём применения обратного двумерного преобразования Фурье к комплексному спектру высот, задаваемому в пространстве пространственных частот  $q_x, q_y$  [1].

Статистические характеристики поверхности определяются через спектральную плотность мощности, степенной характер которой по мере увеличения пространственной частоты уменьшает вклад в энергию спектра в соответствии с показателем Херста (H), характеризующим степень коррелированности микронеровностей и «фрактальность» рельефа.

Исходная спектральная плотность мощности задает лишь относительное распределение энергии по спектру, поэтому далее рассчитывается суммарная энергия спектра и вводится нормирующий коэффициент таким образом, чтобы результирующее среднеквадратичное отклонение высот соответствовало требуемому значению.

После нормировки скорректированная спектральная плотность используется для определения амплитуд всех гармонических компонент с

учёт дискретизации по координатам и размеров области моделирования, в то время как фазы этих компонент выбираются случайным образом из равномерного распределения по диапазону возможных значений. Далее комплексное представление поверхности в частотной области преобразуется в координатное пространство с помощью обратного двумерного преобразования Фурье, в результате чего получается реализация высотной функции в виде двумерного поля [1].

Сгенерированная таким образом поверхность является случайной, но её статистические свойства, включая корреляционную функцию и среднеквадратичное отклонение высот микронеровностей  $\sigma$ , строго контролируются заданным спектром мощности и нормализацией [2, 3].

С помощью изменения параметров исходной спектральной плотности и целевого значения среднеквадратичной шероховатости можно получать реалистичные поверхности с заданными значениями среднеквадратичного отклонения высот в широком диапазоне масштабов. Примеры таких синтезированных поверхностей при различных исходных параметрах, иллюстрирующие универсальность и гибкость метода, приведены на рис. 1.

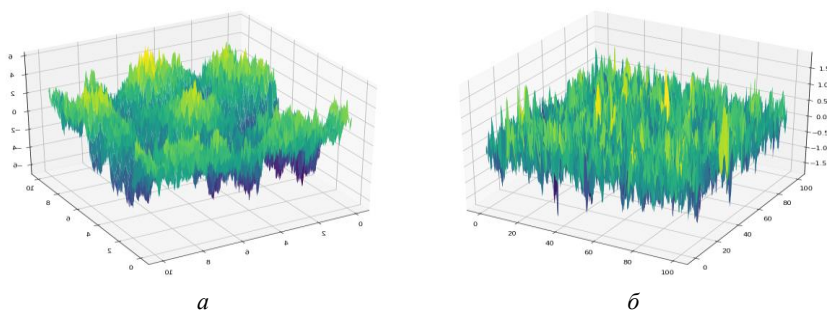


Рис. 1. Влияние параметров моделирования на вид поверхностей:  
 $H = 0,8$ ;  $\sigma_{\text{вход}} = 0,5$ ;  $\sigma_{\text{выход}} = 0,514$  (а),  $H = 0,85$ ;  $\sigma_{\text{вход}} = 0,8$ ;  $\sigma_{\text{выход}} = 0,794$  (б)

#### *Список литературы*

1. Church E.L., Takacs P.Z. Specification of surface figure and finish in terms of PSD // Applied Optics. 1993. V. 32. No. 19. P. 3344-3353.
2. Mack C.A. Generating random rough edges, surfaces, and volumes // Applied Optics. 2013. V. 52. No. 7. P. 1472-1480.
3. Wang Y., Azam A., Wilson M.C.T., Neville A., Morina A. Generating fractal rough surfaces with the spectral representation method // Journal of Engineering Tribology. 2021. V. 235. No. 12. P. 2640-2653.

А.И. ВАНИН<sup>1</sup>, Н.И. ПУЧКОВ<sup>1</sup>, В.Г. СОЛОВЬЕВ<sup>1,2</sup>, М.В. ЯНИКОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Псковский государственный университет

<sup>2</sup>Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного,  
Санкт-Петербург

## **ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ПЛЁНОК ОПАЛОВ**

Для наглядного представления оптических спектров плёнок опалов можно использовать контурные графики в полярных координатах, дающие общую картину угловой дисперсии дифракционных резонансов фотонных кристаллов.

A.I. VANIN<sup>1</sup>, N.I. PUCHKOV<sup>1</sup>, V.G. SOLOVYEV<sup>1,2</sup>, M.V. YANIKOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Pskov State University

<sup>2</sup>S.M. Budyonny Military Academy of Telecommunications, Saint Petersburg

## **PROCESSING AND ANALYSIS OF OPTICAL SPECTRA OF OPAL FILMS**

Contour graphs in polar coordinates can be used to visually represent the optical spectra of opal films, giving an overall picture of the angular dispersion of diffraction resonances of photonic crystals.

Опалы, гранецентрированная кубическая (ГЦК) структура которых образована плотно упакованными сферами с радиусами  $\sim 100$  нм [1], могут выступать в роли фотонных кристаллов (ФК) в видимой области спектра. Для кристаллитов плёночных опалов характерна преимущественная ориентация плоскости (111) вдоль подложки и высокая упорядоченность, что позволяет подробно исследовать наблюдаемые в этих структурах дифракционные резонансы. Получаемый при этом объём данных достаточно велик, поэтому во многих случаях удобно представлять информацию в виде трёхмерных диаграмм и контурных графиков, которые обычно строятся с использованием декартовой системы координат. Такой способ обобщения данных дает общую картину, хотя и скрадывает детали, поэтому там, где это необходимо для анализа, в литературе приводятся отдельные спектры [2].

Для более наглядного представления оптических спектров ФК мы предлагаем использовать также контурные графики в полярных координатах, ярко демонстрирующие общий характер угловой дисперсии дифракционных резонансов (пример на рис. 1), после чего для детального



рассмотрения поведения дифракционных минимумов можно использовать обычные спектры пропускания (рис. 2).

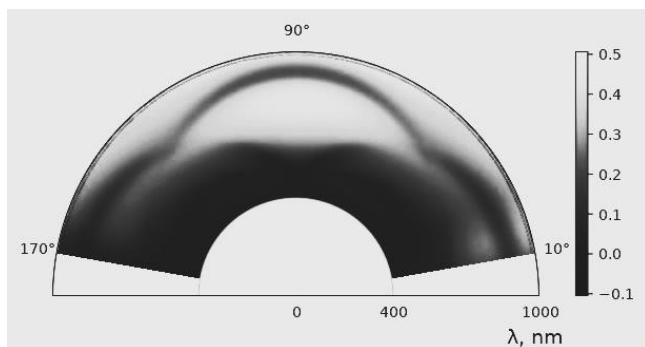


Рис. 1. Контурный график в полярных координатах, показывающий интенсивность s-поляризованного света, пропущенного плёнкой опала, в зависимости от угла скольжения

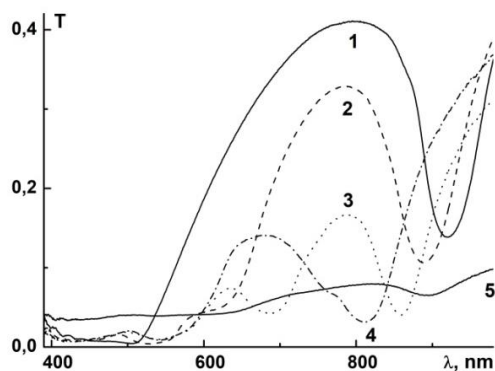


Рис. 2. Спектры пропускания плёнки опала s-поляризованного света при углах падения 0, 20, 40, 60 и 80 ° (кривые 1, 2, 3, 4 и 5 соответственно)

#### Список литературы

1. Балакирев В.Г., Богомолов В.Н., Журавлёв В.В., Кумзеров Ю.А., Петрановский В.П., Романов С.Г., Самойлович Л.А. // Кристаллография. 1993. Т. 38. № 3. С. 111-120.
2. Романов С.Г. Распространение света в неоднородных коллоидных фотонных кристаллах // Дисс. докт. физ.-мат. наук. СПб: ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 2013.

В.В. ГАВРУШКО, М.А. ЗАХАРОВ, О.Р. КАДРИЕВ,  
В.А. ЛАСТКИН<sup>1</sup>, А.В. ПЕТРОВ<sup>1</sup>

*Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого*  
*<sup>1</sup>АО «ОКБ-Планета», Великий Новгород*

## **ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КРЕМНИЕВЫХ ФОТОТРАНЗИСТОРОВ**

Приведены результаты исследования влияния режима работы кремниевого фототранзистора на вид спектральной характеристики. Фототранзистор п-р-п типа с большим коэффициентом усиления ( $\beta \approx 250$ ) при включении с разомкнутой базой обнаружил снижение спектральной чувствительности в коротковолновой области по сравнению с работой при наличии тока смещения.

V.V. GAVRUSHKO, M.A. ZAKHAROV, O.R. KADRIEV,  
V.A. LASTKIN<sup>1</sup>, A.V. PETROV<sup>1</sup>

*Yaroslav the Wise Novgorod State University*  
*<sup>1</sup>JSK «OKB-Planet», Veliky Novgorod*

## **SPECTRAL CHARACTERISTICS OF SILICON PHOTOTRANSISTORS: PECULIARITIES**

The results of a study on the influence of the operating mode of a silicon phototransistor on the spectral characteristic are presented. A n-p-n type phototransistor with a high gain ( $\beta \approx 250$ ), when operated with an open base, showed a decrease in spectral sensitivity in the short-wavelength region compared to operation with a bias current.

Фототранзисторы наряду с другими типами полупроводниковых фотоприёмников находят достаточно широкое практическое применение [1]. Их отличительной особенностью является наличие механизма внутреннего усиления и схемотехническая гибкость, обусловленная наличием дополнительного электрода управления. Фототранзисторы имеют высокую фоточувствительность, превышающую на 2 - 3 порядка чувствительность фотодиодов. Вместе с тем при регистрации сигналов в условиях слабых фоновых засветок могут проявляться специфические особенности фотоприёмников. Так обнаружена зависимость вида спектральной характеристики от рабочего режима фототранзистора.

Структура изготовленного фототранзистора представлена на рис. 1. Глубина эмиттерного перехода составляла 1,85 мкм, а коллекторного

4 мкм. Размеры базовой области 0,7 x 0,7 мм. Коэффициент усиления ( $U_k = 5B$ ,  $I_k = 1\text{ mA}$ )  $\beta \approx 250$ .

Использование базового вывода в отличие от двух выводных фототранзисторов позволяет оказывать дополнительное влияние на характеристики фотоприёмника. На рис. 2 приведены спектральные характеристики фототранзистора при его включении с разомкнутой базой и в режиме с начальным током смещения ( $I_k = 0,3\text{ mA}$ ). Как видно, наблюдалось заметное изменение спектральной характеристики в коротковолновой области спектра. Вероятной причиной могла явиться зависимость скорости поверхностной рекомбинации от величины тока фототранзистора. Наблюдаемый эффект следует учитывать при работе фотоприёмника в условиях слабых освещённостей. Использование трёх выводных фототранзисторов с током смещения выше некоторого порогового значения позволяет стабилизировать вид спектральной характеристики.

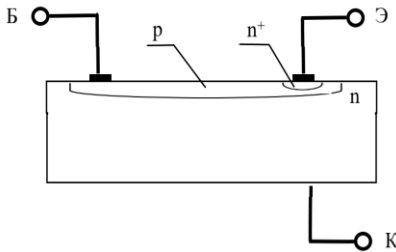


Рис. 1. Структура фототранзистора

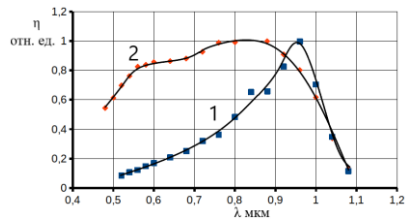


Рис. 2. Спектральная характеристика: база разомкнута (1), ток смещения  $I_k = 0,3\text{ mA}$  (2)

#### Список литературы

1. Берикашвили В.Ш. Электроника и микроэлектроника: импульсная и цифровая электроника. М.: Издательство Юрайт, 2024.

В.Г. ВОЛКОВ, П.Д. ГИНДИН, В.В. КАРПОВ, С.А. КУЗНЕЦОВ

*Акционерное общество «Московский завод «Сапфир», Москва*

## **ЧЕТЫРЁХКАНАЛЬНЫЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ОСВЕТИТЕЛЬ**

Рассматривается четырёхканальный полупроводниковый импульсный лазерный осветитель, генерирующий излучение на длинах волн 0,53, 0,85, 0,9 и 1,55 мкм.

V.G. VOLKOV, P.D. GINDIN, V.V. KARPOV, S.A. KUZNETSOV

*Moscow Sapphire Factory Joint Stock Company, Moscow*

## **FOUR-CHANNEL SEMICONDUCTOR PULSE LASER ILLUMINATOR**

A four-channel semiconductor pulsed laser illuminator generating radiation at wavelengths of 0.53, 0.85, 0.9 and 1.55  $\mu\text{m}$  is considered.

Четырёхканальный полупроводниковый импульсный лазерный осветитель (ИЛО) предназначен для работы в составе активно-импульсного прибора ночного видения (АИ ПНВ) [1] и излучает на четырёх длинах волн. Блок-схема ИЛО дана на рис. 1 [2]. Внешний вид ИЛО дан на рис. 2. Здесь 1 – зеркально-линзовый объектив формирования излучения (ОФИ). Он одержит положительный мениск 2 и вогнутое зеркало 3, зеркально отражающее покрытие (ДОП) 4, первый линзовый компонент 5 – компенсатор полевых аберраций и дихроичное плоское зеркало (ДПЗ) 6. ДЗП 4 отражает на длинах волн 0,85 и 0,9 мкм Мениск 2 пропускает на 0,53, 0,85 и 0,9 мкм. ДПЗ 6 пропускает на 0,85 мкм и отражает на 0,9 мкм. Покрытие 18 отражает на 1,55 мкм и пропускает на 0,53, 0,85 и 0,9 мкм.

Задающий генератор импульсов (ЗГИ) 19 запускает блоки накачки (БН) 8, 10, 14, 16. первый БН 8 создает импульсы тока накачки (ИТН) для первого импульсного лазерного полупроводникового излучателя (ИЛПИ) 7. Его импульсы излучения (ИИ) на 0,85 мкм передаются через ДПЗ 6 в первый линзовый компонент 5, отражаются от кольцевого зеркала 4 и зеркала 3, проходят через мениск 2 и создают на местности пятно подсвета (ПП). Одновременно второй БН 10 создаёт ИТН для второго ИЛПИ 9. Его ИИ на 0,9 мкм. отражаются от ДПЗ 6, приходят в первый линзовый компонент 5, отражаются от зеркала 4, зеркала 3, проходят

через мениск 2 и создают на местности ПП. третий БН 14 создает ИТН для третьего ИЛПИ 13. Его ИИ на 0,53 мкм проходят через второй линзовый компонент 12, отражаются от зеркала 3, проходят через мениск 2 и создают на местности ПП. Четвёртый БН 16 создает ИТН для четвёртого ИЛПИ 15. Его ИИ на 1,55 мкм проходят через третий линзовый компонент 17, отражаются от покрытия 18 и создают на местности ПП. Все четыре пятна подсвета совпадают, и излучение суммируется в едином угле подсвета.

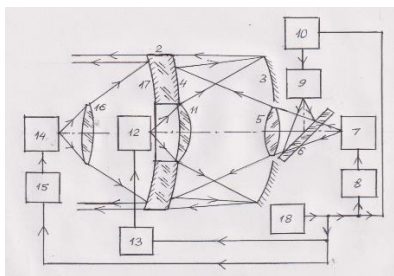


Рис. 1. Блок-схема ИЛО



Рис. 2. Внешний вид ИЛО

В настоящее время разработана принципиальная схема устройства и выполнено его макетирование.

#### Список литературы

1. Волков В.Г., Гиндин П.Д. Достижения в технике видения. В 2-х книгах. Книга 1. М.: Техносфера, 2019.
2. Волков В.Г., Гиндин П.Д., Карпов В.В., Кузнецов С.А. Четырехканальный полупроводниковый импульсный лазерный осветитель. Патент на полезную модель № 230260 по заявке № 2024118801 с приоритетом от 05 июля 2024 г.

И.В. ГАЛАКТИОНОВ<sup>1,2</sup>, А.А. ШАРАФИСЛАМОВ<sup>1</sup>,  
О.В. КОЛЕСНИКОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Московский технический университет связи и информатики*

<sup>2</sup>*Московский политехнический университет*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АБЕРРАЦИЙ ЛИНЗОВЫХ СИСТЕМ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФОКУСИРОВКИ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ**

Представлены результаты фокусировки лазерного пучка диаметром 20 - 40 мм с использованием линзовых систем с различными фокусными расстояниями и контролируемыми аберрациями. Основная идея заключается в анализе влияния сферической аберрации, астигматизма и комы на формирование фокусного пятна и пропускание света через апертуры малых размеров. Для оценки эффективности фокусировки использовался интегральный сигнал фотодиода, позволяющий количественно определить изменение интенсивности при варьировании параметров линзовой системы. Полученные результаты демонстрируют, что компенсация даже ограниченного набора аберраций существенно повышает качество фокусировки и снижает энергетические потери.

I.V. GALAKTIONOV<sup>1,2</sup>, A.A. SHARAFISLAMOV<sup>1</sup>,  
O.V. KOLESNIKOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Moscow Technical University of Communications and Informatics*

<sup>2</sup>*Moscow Polytechnic University*

## **INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF LENS SYSTEM ABERRATIONS ON THE EFFICIENCY OF LIGHT BEAM FOCUSING**

This study presents the results of focusing a laser beam with a diameter of 20 - 40 mm using lens systems with different focal lengths and controlled aberrations. The main idea is to analyze the influence of spherical aberration, astigmatism, and coma on the formation of the focal spot and the transmission of light through small apertures. To evaluate the focusing efficiency, the integral signal from a photodiode was used, allowing for a quantitative determination of the intensity change when varying the parameters of the lens system. The obtained results demonstrate that compensating for even a limited set of aberrations significantly improves the focusing quality and reduces energy losses.

Современные оптические системы в телекоммуникациях, сенсорике и лазерной обработке требуют высокой точности формирования и фокусировки световых пучков. Одним из ключевых факторов, ограничивающих качество фокусировки, являются аберрации линз – сферическая, кома, астигматизм и хроматические искажения. Они приводят к увеличению диаметра фокусного пятна, снижению пиковой интенсивности и уменьшению пропускания через малые апертуры.

В исследовании экспериментально анализируется влияние низко и высокопорядковых аберраций на фокусировку лазерного пучка диаметром 20 - 40 мм с использованием линзовых систем с фокусным расстоянием от 50 до 150 мм. Формирование аберраций осуществлялось с помощью фазового модулятора, а их компенсация методом итеративной оптимизации, основанной на измерении интегрального сигнала фотодиода. Параметры фокусного пятна оценивались по критерию минимизации площади распределения энергии и максимизации интенсивности в центре.

Эксперимент показал, что коррекция даже ограниченного набора аберраций позволяет уменьшить диаметр фокусного пятна в среднем на 25 - 40 %, а пропускание через отверстия 10 - 20 мкм – увеличить до трёх раз. Полученные результаты демонстрируют значимость адаптивной коррекции в компактных оптических системах, где использование сложных зеркальных корректоров невозможно. Предложенный подход может быть применён в системах свободнопространственной связи, микроскопии высокого разрешения, лазерном 3D-печати и прецизионной обработке материалов.

В.Г. ВОЛКОВ, П.Д. ГИНДИН, В.В. КАРПОВ, С.А. КУЗНЕЦОВ

*Акционерное общество «Московский завод «Сапфир», Москва*

## **МОДУЛЬНЫЙ ОСВЕТИТЕЛЬ-ЦЕЛЕУКАЗАТЕЛЬ**

Рассматривается принцип построения многоканального осветителя-целеуказателя модульной конструкции на базе полупроводниковых излучателей для приборов ночного видения и тепловизионных приборов.

V.G. VOLKOV, P.D. GINDIN, V.V. KARPOV, S.A. KUZNETSOV

*Moscow Sapphire Factory Joint Stock Company, Moscow*

## **MODULAR LIGHTING AND TARGETING DEVICE**

The article discusses the principle of building a multi-channel illuminator-target pointer of a modular design based on semiconductor emitters for night vision and thermal imaging devices.

В настоящее время в современной технике ночного видения широко используются осветители и целеуказатели, работающими совместно с приборами ночного видения (ПНВ) [1]. Однако возникает потребность в круглосуточном, всепогодном и многофункциональном их применении. Кроме того, широкое распространение получили тепловизионные приборы (ТВП), работающие в области спектра 3 - 5 и 8 - 14 мкм [1]. Для них также нужны осветители и целеуказатели, работающие в указанных спектральных областях.

Известны комбинированные осветители-целеуказатели на основе галогенных ламп либо светодиодов (СД) белого цвета свечения и лазерных диодов (ЛД), работающих в красной области спектра (0,635 - 0,67 мкм) либо на длине волны 0,532 мкм, а также ИК ЛД с длиной волны 0,82 - 0,85 мкм [1]. Особо следует остановиться на работе квантово-каскадных лазеров в терагерцовой (ТГц) области спектра (10 - 50 мкм). ТГц-волны отражаются от металлов, но проникают через пластмассу, бумагу, сухую древесину, камень, одежду, керамику, тело человека, любые мутные среды и мелкодисперсные материалы из-за резкого подавления рэлеевского рассеяния. В отличие от рентгеновских лучей ТГц-лучи не опасны, так как не производят ионизацию среды и повреждение биологических молекул. Это позволяет производить безвредную для человека диагностику, в том числе раковых опухолей, глубины и степени ожогов. ТГц-лучи перспективны для разработки



системы безопасности [1]. Таким образом, возникает необходимость создания многоканальных осветителей-целеуказателей модульной конструкции. Его блок-схема представлена на рис. 1, а внешний вид – на рис. 2.

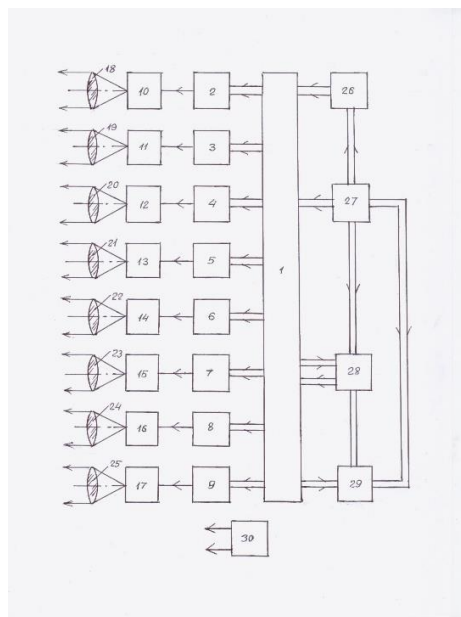


Рис. 1. Блок-схема осветителя-целеуказателя

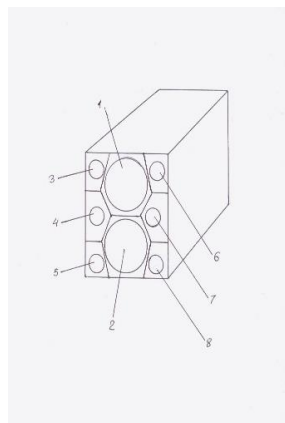


Рис. 2. Внешний вид прибора

В состав модульного осветителя-целеуказателя входят светодиодные осветители с длиной волны 0,532 мкм (для подводного видения) и белого цвета свечения (для видения в темноте), а также лазерные осветители-целеуказатели с длинами волн 0,395 мкм (для видения радиационного облака), 0,532, 0,85 и 1,55 мкм (для видения в ПНВ в наземных условиях), 4,5 и 10,6 мкм (для видения в ТВИ), 20 и 30 мкм с вариобъективами, обеспечивающими режим подсвета и режим целеуказания в ТГц-области спектра. На рис. 2 элементарные осветители-целеуказатели показаны позициями соответственно 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8. Модульная конструкция устройства позволяет перестраивать его в зависимости от конкретного назначения.

#### Список литературы

1. Волков В.Г., Гиндин П.Д. Достижения в технике видения. Техносфера, 2019.

Н.И. ПЕТРОВ

*Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва*

## **ИНФОРМАЦИОННАЯ ЭНТРОПИЯ ЧАСТИЧНО-КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ГРАДИЕНТНОМ СВЕТОВОДЕ**

Исследована непараксиальная эволюция информационной энтропии частично когерентного пучка света при распространении в градиентном волноводе с помощью методов когерентных состояний и разложения поля по модам. Показано, что как радиус когерентности, так и энтропия могут быть определены из измерений геометрических характеристик пучка.

N.I. PETROV

*Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow*

## **INFORMATION ENTROPY OF PARTIALLY COHERENT LIGHT IN A GRADED-INDEX WAVEGUIDE**

The nonparaxial evolution of the information entropy of a partially coherent light beam during propagation in a graded-index waveguide is investigated using the coherent states and mode decomposition methods. It is shown that both the radius of coherence and entropy can be determined from measurements of the geometric characteristics of the beam.

Термин энтропия широко используется в различных областях науки и техники. Энтропия также играет важную роль в теории передачи информации. Известно, что энтропия является мерой недостатка информации о системе. Понятие энтропии, связанное с частично когерентным оптическим излучением, привлекло внимание с момента разработки теории оптической когерентности [1 - 3]. В этом случае энтропия определяется из функции когерентности излучения [2 - 6].

В данной работе исследуется поведение информационной энтропии и функции когерентности частично когерентного пучка при распространении в волноводе с градиентным профилем показателя преломления. Информационная энтропия определяется по формуле [2]:

$$S = -\sum_m \lambda_m \ln \lambda_m, \quad (1)$$

где  $\lambda_m$  – вероятность возбуждения  $m$ -й моды, то есть доля мощности излучения, переносимая этой модой.

На рис. 1 представлены зависимости чистоты излучения и энтропии от радиуса когерентности для различных ширин падающего пучка, а также зависимость отношения радиуса когерентности  $r_c$  к ширине пучка  $\sigma_x$  от расстояния.

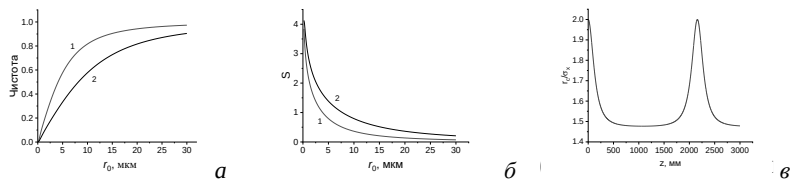


Рис. 1. Чистота (а) и энтропия (б) в зависимости от радиуса когерентности  $r_0$  для различных ширин пучка: 1 –  $a_0 = 5$  мкм, 2 –  $a_0 = 10$  мкм,  $w = 7 \cdot 10^{-3}$  мкм $^{-1}$  – градиентный параметр, зависимость  $r_c/s_x$  от расстояния  $z$  (в)

Локальная энтропия определяется степенью когерентности  $\gamma$  [3]:

$$S_L = \text{Log}(1 - |g^2(z)|). \quad (2)$$

На рис. 2 представлены зависимости степени когерентности и энтропии от расстояния. Результаты представляют интерес для передачи информации, оптической визуализации и волоконно-оптической связи.

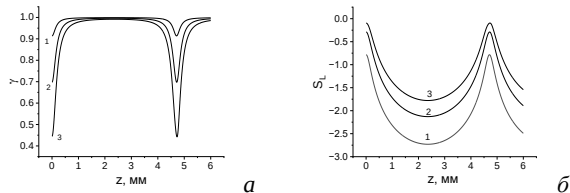


Рис. 2. Степень когерентности (а) и локальная энтропия (б) в зависимости от расстояния для различных значений  $s = x' - x$ , 1 –  $s = 3$  мкм, 2 –  $s = 6$  мкм, 3 –  $s = 9$  мкм,  $r_0 = 10$  мкм,  $a_0 = 5$  мкм,  $\omega = 10^{-3}$  мкм $^{-1}$

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного задания FFNS-2025-0007.

#### Список литературы

1. Mandel L., Wolf E. Optical coherence and quantum optics. Cambridge, UK, 1995.
2. Krivoslykov S.G., Petrov N.I., Sissakian I.N. // Opt. and Quant. Electr. 1985. V. 18. P. 253-264.
3. Refregier P., Morio J. // J. Opt. Soc. Am. A. 2006. V. 23. P. 3036-3044.
4. Petrov N.I. // Photonics. 2023. V. 10. P. 857.
5. Petrov N.I. // Opt. Lett. 2023. V. 48. No. 22. P. 6048-6051.
6. Petrov N.I. // Opt. Lett. 2025. V. 50. P. 6309-6312.

А.П. ЛАВРОВ, С.И. ИВАНОВ

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого***ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА  
В ОПТОВОЛОКОННОЙ СТРУКТУРЕ MMF-SMF**

Представлены результаты численного моделирования изменения пространственного распределения при распространении излучения в многомодовом волокне и мощности в состыкованном с ним одномодовом волокне.

A.P. LAVROV, S.I. IVANOV

*Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University***OPTICAL SIGNAL TRANSFORMATION  
IN MMF-SMF FIBER OPTIC STRUCTURE**

The results of numerical modeling of the change in spatial distribution during radiation propagation in a multimode fiber and power in a single-mode fiber connected to it are presented.

Модель волновода – осесимметричная структура с показателем преломления среды  $n = 1,467$ , сердцевина с диаметром  $d = 50$  мкм и показателем преломления  $n + \Delta n(r)$ . Рассматриваются профили сердцевинного градиентный  $\Delta n(r) = \Delta n \cdot [1 - (2r/d)^2]$  и ступенчатый  $\Delta n(r) = \Delta n$ . На оси  $\Delta n = 0,15$ . Диаметр оболочки  $D = 125$  мкм. При заданной комплексной амплитуде (КА) монохроматического с  $\lambda = 1,5$  мкм излучения  $E_{in}(x, y)$  на торце волокна ( $z = 0$ ) рассчитываются её изменения  $E(x, y, z)$  в последующих сечениях  $z > 0$ . Метод расчёта – пошаговый split-step метод с малым шагом  $dz = 1,0$  мкм. Для расчётов используется оптический пакет GLAD [1]. Неоднородность структуры в поперечном сечении, то есть  $\Delta n(r)$ , учитывается как возмущение фазы  $\Delta \varphi(r) = 2\pi \Delta n(r) dz / (\lambda/n)$  для КА  $E(x, y, z)$  а затем по возмущённой КА выполняется расчёт  $E(x, y, z + dz)$  на основе концепции плоских волн. На каждом шаге  $dz$  значения  $E(x, y, z)$  вне оболочки ( $r > D/2$ ) обнулялись. Расчёты проводились на квадратной сетке на апертуре XY  $500 \times 500$  мкм<sup>2</sup>. Для возбуждения многих мод использовалось входное шумовое распределение  $E_{in}(x, y)$  с гауссовым пространственным спектром с разными радиусами корреляции  $R_c$ .

На рис. 1 приведены примеры распределений  $E(x, y)$  (в виде  $|E(x, y)|^2$ ) на расстоянии  $Z = 2400$  мкм в градиентном (1) и ступенчатом (2) волокнах при одинаковом входном распределении  $E_{in}(x, y, z = 0)$ ,  $R_c = 4,24$  мкм.

Процесс установления «стационарного» модового состава происходит достаточно быстро на расстояниях  $Z \approx 1$  мм [2]. Рис. 2 иллюстрирует рассеяние излучения оболочечных и высших мод: показано изменение общей мощности излучения  $P(z)$  (в круге с  $D = 125$  мкм) для градиентного (1) и ступенчатого (2) волноводов. Мощность на входе волокон  $P = 0,2$  мВт. На рис. 3 показано изменение мощности  $P_{\text{SMF}}(z)$ , вводимой в SMF волокно.  $P_{\text{SMF}}(z)$  – это мощность интеграла перекрытия  $E(x,y,z)$  с модой  $E_{\text{gaus}}(x,y) = 1 \cdot \exp [-(x^2+y^2)/r_0^2]$ , где  $r_0 = 4.5$  мкм.

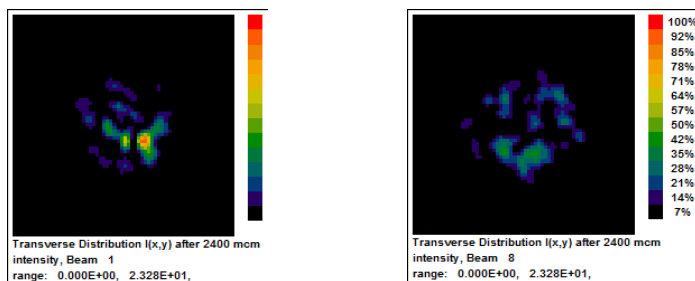


Рис. 1. Распределения интенсивности в градиентном и ступенчатом волокнах

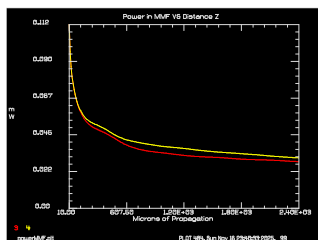


Рис. 2. Изменение мощности в MMF

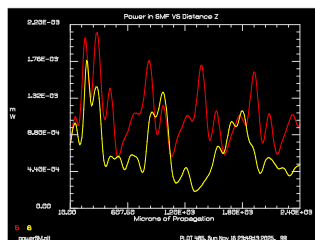


Рис. 3. Изменение мощности в SMF

Рассмотренная структура является частью широко исследуемых в настоящее время датчиков физических величин со структурой SMF-MMF-SMF [3]. Полученные в расчётах результаты позволяют прояснить характер распространения излучения в них.

#### Список литературы

1. General Laser Analysis and Design. <https://aor.com>.
2. Лавров А.П., Иванов С.И. // XIV международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2025. С. 625.
3. Wu Q., Qu Y., et al. // IEEE Sensors Journal. 2021. V. 21 (11). P. 12734.

**В.И. БУСУРИН, А.Н. ТЮНИН**  
*Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)*

## **КОМПЕНСАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРЕНИЯ НА ОСНОВЕ СВЯЗАННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ**

Исследован комплексный метод компенсации температурной неустойчивости преобразователя линейного ускорения на основе связанных оптических волноводов. По результатам экспериментальных исследований определена неустойчивость смещения нуля и масштабного коэффициента в заданном диапазоне температур.

**V.I. BUSURIN, A.N. TYUNIN**  
*Moscow Aviation Institute (National Research University)*

## **COMPENSATION FOR TEMPERATURE INSTABILITY OF THE CHARACTERISTICS OF A LINEAR ACCELERATION TRANSDUCER BASED ON COUPLED OPTICAL WAVEGUIDES**

A comprehensive method for compensating for temperature instability in a linear acceleration transducer based on coupled optical waveguides was investigated. Based on the experimental results, the zero offset and scale factor instability were determined over a given temperature range.

Рассматривается преобразователь линейного ускорения, в котором в качестве чувствительного элемента используются связанные оптические волноводы (СОВ). В состав предлагаемого преобразователя линейного ускорения на основе СОВ входят источник оптического излучения, два фотоприёмника, схема обработки информации, СОВ, закреплённые на воспринимающей линейное ускорение балке [1, 2].

Воздействие температуры на преобразователь линейного ускорения на основе СОВ проявляется через смещение центральной длины волны источника оптического излучения, возникновение термомеханических деформаций чувствительного элемента и проявление термооптической зависимости показателя преломления материалов СОВ.

Теоретически и экспериментально оценено влияние температуры на преобразователь линейного ускорения на основе СОВ с диапазон измерения  $\pm 20$  g. При изменении температуры в диапазоне от  $-20$  до  $+50$  °C нестабильность смещения нуля составила  $0,0131$  g/°C, нестабильность масштабного коэффициента –  $0,0701$  %/°C. Повышение температурной стабильности достигается за счёт компенсации температуры источника оптического излучения с помощью встроенного элемента Пельтье и компенсации температурной нестабильности чувствительного элемента за счёт размещения в непосредственной близости термодатчика P1000 и идентичных СОВ, сигналы с которых сравниваются с полезным сигналом (рис. 1).

Результаты экспериментальных исследований подтвердили эффективность комплексного метода температурной компенсации. При изменении температуры в диапазоне от  $-20$  до  $+50$  °C нестабильность смещения нуля составила  $0,0008$  g/°C, нестабильность масштабного коэффициента –  $0,0004$  %/°C.

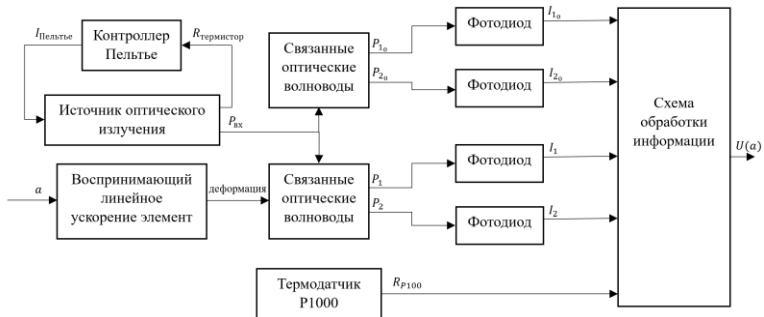


Рис. 1. Схема компенсации температурной нестабильности преобразователя линейного ускорения на основе СОВ

#### Список литературы

1. Бусурин В.И., Казарьян А.В., Жеглов М.А., Тюнин А.Н. Волоконно-оптический преобразователь линейного ускорения. Патент РФ 2 839 318. № 024133881; заявл. 12.11.2024; опубл. 29.04.2025.
2. Tong W., Wei Y., Zhou H., Dong J, Zhang X. The design of a low-loss, fast-response, metal thermo-optic phase shifter based on coupled-mode theory // Photonics. 2022. V. 9. P. 447.

А.А. МАРКВАРТ, Л.Д. ЗАВАЛИШИНА, В.Д. ФИЛОНОВ,  
О.Г. БОБЫЛЕВА, А.Л. ГРАЖДЯН, А.В. ПЕТРОВ,  
Л.Б. ЛЮКУМОВИЧ, Н.А. УШАКОВ

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

## **МЕЖМОДОВЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР С ТЭЙПИРОВАННЫМ МАЛОМОДОВЫМ ВОЛОКНОМ**

Предложен межмодовый волоконный интерферометр с тэйпированным маломодовым оптоволоком для измерения показателя преломления внешней среды. Такой интерферометр может иметь на порядок меньшую длину чувствительного к внешней среде участка, позволяющую наблюдать интерференционную картину в спектральной области, по сравнению с интерферометрами с тэйпированным одномодовым волокном.

A.A. MARKVART, L.D. ZAVALISHINA, V.D. FILONOV,  
O.G. BOBYLEVA, A.L. GRAZHDIAN, A.V. PETROV,  
L.B. LIOKUMOVICH, N.A. USHAKOV

*Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University*

## **INTERMODE FIBER OPTIC INTERFEROMETER WITH TAPERED FEW MODE FIBER**

An intermode fiber interferometer with a taped few-mode optical fiber is proposed for measuring the refractive index of an external medium. This interferometer can have an order of magnitude shorter sensitive section, allowing for the observation of an interference pattern in the spectral region, compared to interferometers with a taped single-mode fiber.

Волоконно-оптические датчики являются привлекательными благодаря высокой точности, компактным размерам, долговечности, гибкости, биосовместимости, электровзрывобезопасности, устойчивости к электромагнитным помехам, устойчивости к химической коррозии и радиации [1]. Актуальным и активно развивающимся направлением исследований является оптическая инспекция жидкостей и тканей для задач биомедицины и использованием таких методов, как оптическая микроскопия и спектроскопия, оптическая когерентная томография, оптическая когерентная эластография и другие. Отдельный интерес представляет комбинирование данных методов с датчиками таких параметров внешней среды, как показатель преломления, уровень pH,



температура. Это позволит собрать больше информации об инспектируемой ткани, что потенциально может повысить информативность и точность методов биомедицинской диагностики. Так, информация о распределении этих параметров может помочь в локализации пораженных областей ткани. Для выполнения задач по инспекции тканей подойдут не все виды оптоволоконных датчиков. Например, интерферометр Фабри-Перо имеет внутренний резонатор, который не может контактировать с тканью [1]. Оптоволоконный зонд с измерением френелевского отражения на границе кварц-ткань [1] не подойдет при исследовании многослойной ткани с большими отражениями на границах слоёв. Межмодовые интерферометры на основе SMS-структур или тэйпированного одномодового волокна обычно имеют длину порядка нескольких сантиметров [1], что затрудняет измерение показателя преломления в малой области. Наиболее подходящим является датчик на основе поверхностного плазмонного резонанса [1], в котором на скошенный торец волокна нанесен слой металла толщиной в несколько десятков нанометров. Однако он сложен в изготовлении.

В работе предложен и экспериментально реализован волоконно-оптический датчик показателя преломления внешней среды, который имеет длину чувствительной области в доли миллиметра и при этом прост в изготовлении. Он основан на волоконной структуре «одномодовое волокно – тэйпированное (конусное) маломодовое волокно». В ней формируется межмодовый интерферометр, аналог интерферометра Майкельсона, плечами интерферометра являются две моды маломодового оптического волокна, возбуждённые подводящим одномодовым волокном. Чувствительность к изменению параметров внешней среды обеспечивается тэйпированием маломодового волокна на конце с длиной конуса порядка долей миллиметра. В отличие от интерферометра с тэйпированным одномодовым волокном, здесь для наблюдения интерференционной картины в спектральной области не требуется делать длинный в несколько сантиметров тэйпер, так как необходимая разность оптических путей между модами набирается за счёт не тэйпированной части маломодового волокна. Дополнительными преимуществами является более устойчивая к внешним механическим воздействиям конструкция в отличие от классического одномодового тэйпера.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-72-10095.

*Список литературы*

1. Urrutia A., et al. // *Laser & Photonics Reviews*. 2019. V. 13. No. 11. P. 1900094.

Е.К. ФЕДОРОВ, И.Н. ПАВЛОВ

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва*

## **ИНТЕРФЕРОМЕТР НА ОСНОВЕ НАРУШЕННОГО ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ**

В работе описана экспериментальная установка интерферометра на основе нарушенного полного внутреннего отражения. Данная экспериментальная установка позволяет исследовать распределение показателя преломления тонкого пограничного слоя образца с высокой точностью. Также описанная установка позволяет наблюдать изменение показателя преломления изучаемого образца в реальном времени.

E.K. FEDOROV, I.N. PAVLOV

*National Research University MPEI (Moscow Power Engineering Institute)*

## **INTERFEROMETER BASED ON FRUSTRATED TOTAL INTERNAL REFLECTION**

The paper describes an experimental interferometer setup based on frustrated total internal reflection. This experimental setup allows for the high-precision investigation of the distribution of refractive index of a thin boundary layer of sample. Also, the described setup allows to observe the change in the refractive index of the studied sample in real time.

Интерференционный метод часто применяется для высокоточной диагностики и мониторинга технологических процессов в физических, биологических и инженерных науках [1]. Метод нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) нашел широкое применение в оценке качества природных углеводородов [2]. Объединив метод НПВО и интерференционный метод, можно получить прибор, имеющий некоторые преимущества. Основным является высокая чувствительность, что позволяет выполнять более точные измерения [3]. Также данный прибор позволяет наблюдать в реальном времени изменение показателя преломления исследуемого объекта [4]. Интерферометры на базе явления НПВО представляют собой важный класс оптических устройств, применяемых в сенсорике и биомедицинской диагностике.

Целью данной работы является сборка и юстировка экспериментальной установки, а также проведение эксперимента для определения показателя преломления исследуемой жидкости. Схема

экспериментальной установки представлена на рис. 1. В качестве базовой схемы была выбрана схема интерферометра Маха–Цендера.

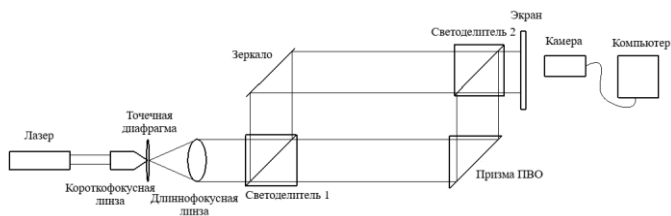


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Лазерное излучение попадает на телескопическую систему, состоящую из короткофокусной и длиннофокусной линзы, между которыми находится точечная диафрагма, которая работает как низкочастотный фильтр. После этого излучение делится светоделителем 1. В одном плече установлено зеркало, чтобы направить излучение на светоделитель 2. В другом плече функцию зеркала выполняет стеклянная призма ПВО. Внешняя грань призмы контактирует с исследуемым объектом. После отражения от призмы лучи из двух плеч собираются с помощью светоделителя 2 и попадают на экран. Изображение на экране регистрируется камерой, информация с которой записывается на компьютер. Основным отличием от стандартной схемы интерферометра на основе НПВО заключается в том, что призма ПВО играет роль одного из зеркал. Данное изменение позволяет уменьшить габаритный размер установки, а также сократить количество используемых элементов, что упрощает процесс юстировки. При изменении показателя преломления образца на экране наблюдаются перемещающиеся интерференционные полосы. По количеству смещённых интерференционных полос определяется изменение показателя преломления.

#### Список литературы

1. Park J.S., Lie Y., Kim H.J., Kim I.I. Development of aperture total internal reflection (A-TIR) for micro droplets and fingerprint patterns characterization // Optics Communications. 2019. P. 124414.
2. Рахимов Н.Р., Тынчеров К.Т., Селиванова М.В., Альмухаметова Э.М. // Датчики и системы. 2018. № 7 (227). С. 27-33.
3. Wu C.M., et al. High-sensitivity sensor based on surface plasmon resonance and heterodyne interferometry // Sensors and Actuators B: Chemical. 2003. V. 92. No. 1-2. P. 133-136.
4. Chen K.H., et al. Full-field refractive index measurement using absolute-phase total internal reflection heterodyne interferometry // Applied Physics B. 2020. V. 126. P. 1-7.

А.Ю. ПОГИБА, В.Ю. ВЕРЕЩАГИН, В.К. ДОЛГОНОСОВ,  
А.П. КОНДРАТОВ

*Московский политехнический университет*

## **ЭФФЕКТ БРЮСТЕРА В МАРКИРОВКЕ ПОЛИМЕРНОЙ УПАКОВКИ**

Исследуется влияние степени усадки термоусадочной плёнки поливинилхлорида в составе групповой упаковки или многослойного покрытия тары с зеркальной поверхностью на эффект плеохроизма в поляризованном свете. Оцениваются спектрофотометрические характеристики пакетов плёнки полипропилена марки «Биакспен» с внешним слоем поливинилхлорида в проходящем и отражённом от зеркальной поверхности поляризованном свете.

A.Yu. POGIBA, V.Yu. VERESHCHAGIN, V.K. DOLGONOSOV,  
A.P. KONDRATOV

*Moscow Polytechnic University*

## **THE BREWSTER'S EFFECT IN POLYMER PACKAGING LABELING**

The effect of the shrinkage degree of a polyvinyl chloride shrink film in a group package or a multilayer coating of a container with a mirrored surface on the pleochroism effect in polarized light is investigated. The spectrophotometric characteristics of Biaxplen polypropylene film packages with an outer layer of polyvinyl chloride in polarized light transmitted and reflected from a mirror surface are evaluated.

В современном мире вопросы защиты прав потребителей и борьбы с контрафактной продукцией становятся всё более значимыми [1]. Скрытая маркировка – технология, позволяющая наносить на товары специальные метки, которые невозможно обнаружить невооружённым глазом. Получение цветных эффектов в плёнках термопластичных полимеров предполагает использование двух поляризаторов – светофильтров: одного на источнике света, а второго на устройстве считывания информации [2]. Настоящее исследование демонстрирует возможность отказа от одного поляризатора или источника поляризованного света для маркировки и/или считывания информации. Возможность отказа от одного поляризатора, расположенного на источнике света основана на использовании эффекта Брюстера [3]. Необходимая для считывания информации, например, в форме с невидимого логотипа или штрих-кода поляризации света происходит при его отражении от зеркальной поверхности тары.

На рис. 1 показана схема измерения параметров цвета информационных символов на светоотражающей поверхности (алюминиевая фольга), а на рис. 2 вид и спектр цветов пакета (многослойной плёнки) поливинилхлорида (ПВХ) и полипропилена (четыре слоя). Плёнка термоусадочного ПВХ образует внешний слой этикетки и обеспечивает фиксацию всех слоёв материала на таре. В одном из четырёх слоёв полипропилена вырезан информационный символ – штриховой код (не показан). Вид штрихов в поляризованном свете представлен в виде квадратных фотографий участков многослойной плёнки (штрихов) и её спектров. Штрихи не видны в неполяризованном свете. Применяя фильтр-поляризатор при фотографировании можно увидеть скрытую маркировку неразличимую человеческим глазом при обычном освещении. Однако обнаружения маркировки недостаточно для передачи информации сканеру ШК, применяемому в торговле.

Многослойный материал из плёнок ДОПП и термоусадочного ПВХ содержит штриховой код в пурпурном цвете, который не идентифицируется сканером, так как лазерный элемент, считывающий изображения, имеет излучатель с длиной волны близкой к максимуму поглощения. Термообработка плёнки меняет цвет изображения на зелёный и обеспечивает защиту от подделки.

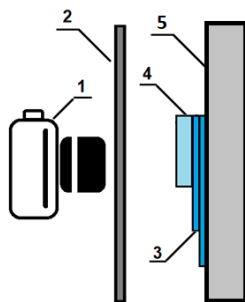


Рис. 1. Схема измерения:  
1 – камера, 2 – поляризатор,  
3 – ДОПП; 4 – ПВХ; 5 – зеркало

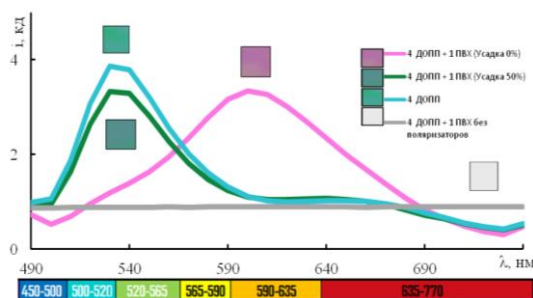


Рис. 2. Спектр многослойной плёнки  
в поляризованном свете и без поляризатора

#### Список литературы

1. Kondratov A.P., Nikolaev A.A., Nazarov V.G., Vereshchagin V.Y., Volinsky A.A. // Journal of Applied Polymer Science. 2023. V. 140. No. 41. P. e54532.
2. Погиба А.Ю., Кондратов А.П. // Ползуновский вестник. 2025. № 2 С. 214-219.
3. Osterman J., Skarp K. // Optics Express. 2003. V. 11. No. 10. P. 1197-1202.

И.Н. ПАВЛОВ, О.В. КОРОЛЬКОВА

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва*

## **ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ДОЖДЯ И ТУМАНА НА ОСНОВЕ НАРУШЕННОГО ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ**

Представлены результаты разработки и моделирования оптического датчика дождя и тумана на основе нарушенного полного внутреннего отражения и обратного рассеяния. Создана трёхмерная модель датчика в специализированном программном обеспечении, выполнено её тестирование с использованием симуляции дождя и тумана. Собран макет датчика, проведены измерения и построен график зависимости выходного сигнала фотоприёмника от времени при наличии дождя и при наличии тумана.

I.N. PAVLOV, O.V. KOROLKOVA

*National Research University «MPEI» (Moscow Power Engineering Institute)*

## **OPTICAL RAIN AND FOG SENSOR BASED ON FRUSTRATED TOTAL INTERNAL REFLECTION**

The results of the development and modeling of an optical rain and fog sensor based on frustrated total internal reflection and backscattering are presented. A three-dimensional model of the sensor was created in specialized software and tested through simulations of rain and fog. An experimental setup of the sensor was assembled, measurements were carried out, and a graph of the photodetector output signal versus time was obtained for conditions of rain and fog.

Для надёжной работы современных технических систем необходимы средства, способные быстро выявлять появление дождя, тумана и других факторов, влияющих на прозрачность атмосферы. Оптические сенсоры остаются одним из наиболее эффективных решений.

Оптический датчик влажности из патента [1] использует линзу со сферической внешней и комбинированной внутренней поверхностями, где размещены светодиоды и фотодетекторы. Инфракрасное излучение отражается под  $90^\circ$  и фокусируется на приёмнике. При наличии влаги условия полного внутреннего отражения нарушаются, что приводит к снижению сигнала на приёмнике.

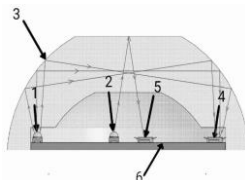
Оптические датчики тумана на основе обратного рассеяния применяются в системах мониторинга атмосферы, установках сбора влаги

и оптических навигационных системах транспорта для работы в условиях ограниченной видимости [2, 3].

Актуальной является разработка сенсоров, совмещающих несколько функций для расширения возможностей применения. Настоящая работа посвящена созданию оптического датчика на основе явления нарушенного полного внутреннего отражения, способного регистрировать как туман, так и дождь. Совмещение двух функций в одном устройстве повышает информативность, снижает затраты и обеспечивает более надёжный контроль прозрачности атмосферы в реальном времени. На рис. 1 приведена схема разработанного датчика.

Рис. 1. Схема оптического купольного датчика:

- 1 – источник излучения для детектирования дождя,
- 2 – источник излучения для детектирования тумана,
- 3 – прозрачный купол, 4 – приёмник отражённого излучения,
- 5 – приёмник рассеянного излучения,
- 6 – печатная плата



Принцип действия сенсора основан на контроле оптического сигнала, поступающего на приёмник 4. Излучение распространяется внутри купола 3, падая на внутреннюю поверхность под углом, близким к углу полного внутреннего отражения, и направляется на приёмник 4. При оседании капель воды условия отражения нарушаются, сигнал снижается и фиксируется электронной схемой на плате 6 как признак дождя. Для регистрации тумана источник излучения 2 направляет свет через плоскую часть купола. Рассеянное на водяных частицах излучение возвращается внутрь датчика и регистрируется приёмником 5. Интенсивность обратного рассеяния определяет плотность тумана.

На основании схемы, представленной на рис. 1, был собран макет датчика, и проведены тестовые эксперименты по оценке его эффективности.

Работа выполнена в рамках проекта «Оптические датчики дождя и тумана» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2024 - 2026 гг.

#### *Список литературы*

1. Teder R.S. Optical moisture sensor. US Patent US8271198B2. 2012.
2. Straub D.J. Detecting the presence of fog using low-cost proximity sensors // Aerosol and Air Quality Research. 2020. V. 20. No. 5. P. 981-990.
3. Ballesta-García M., Valdivia-Domínguez J., et al. Experimental characterization of polarized light backscattering in fog environments // Sensors. 2023. V. 23. No. 21. P. 1-12.

Д.В. МАКСИМОВ, С.И. ЯКУБОВ, М.В. БРЕЦЬКО,  
С.И. ХАЛИЛОВ, С.Н. ЛАПАЕВА

*Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь*

## **АСТИГМАТИЧЕСКОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ ВЕКТОРНЫХ МОД**

В работе исследуется влияние астигматического преобразования на поляризационные пучки Лагерра–Гаусса при прохождении через цилиндрическую линзу. Выявлено, что линза вызывает сложные изменения фазовой и поляризационной структуры пучков: рождение, слияние и аннигиляцию поляризационных сингулярностей (С-точек и V-точек), изменение топологии эллипсов поляризации. Результаты позволяют лучше понять устойчивость векторных мод в асимметричных оптических элементах и могут применяться в фотонных устройствах.

D.V. MAKSIMOV, S.I. YAKUBOV, M.V. BRETSKO,  
S.I. KHALILOV, S.N. LAPAEVA

*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol*

## **ASTIGMATIC TRANSFORMATION OF THE POLARIZATION STRUCTURE OF VECTOR MODES**

The study investigates the impact of astigmatic transformation on Laguerre–Gaussian polarization beams propagating through a cylindrical lens. It is revealed that the lens induces complex alterations in the phase and polarization structure of the beams, including the generation, coalescence, and annihilation of polarization singularities (C-points and V-points), as well as modifications in the topology of polarization ellipses. The findings contribute to a deeper understanding of the stability of vector modes in asymmetric optical elements and hold potential for applications in photonic devices.

Развитие оптических технологий расширяет возможности управления световыми полями с помощью оптических элементов и свойств света. Астигматические компоненты вызывают существенное преобразование фазовой и амплитудной структуры Лагерр–Гауссовых (ЛГ) пучков.

Цель работы – экспериментальное исследование астигматического преобразования стандартных векторных ЛГ пучков.

Основными задачами эксперимента было формирование векторного пучка, и исследование его астигматического преобразования. Для этого





Д.С. ЛЁВИН, И.Н. ПАВЛОВ

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МУТНЫХ ЖИДКИХ СРЕД С ПОМОЩЬЮ ПАРАМЕТРОВ СТОКСА–МЮЛЛЕРА**

В работе проводится исследование мутных жидких сред, содержащих частицы глины и оксида кремния, с использованием математического аппарата Стокса–Мюллера в границах теории рассеивания Ми. В рамках исследования измеряются индикатриссы рассеяния для определения распределения частиц по размерам. С помощью созданной поляриметрической установки измеряются параметры Стокса–Мюллера, что позволит провести анализ формы рассеивающих частиц, определить их концентрацию и оптическую анизотропию.

D.S. LEVIN, I.N. PAVLOV

*National Research University MPEI (Moscow Power Engineering Institute)*

## **INVESTIGATION OF TURBID LIQUID MEDIA USING STOKES–MULLER PARAMETERS**

This study investigates turbid liquid media containing clay and silica particles using the Stokes–Muller theory within the framework of Mie scattering theory. The study measures scattering indicatrices to determine particle size distribution. Using a polarimetric setup, Stokes–Muller parameters are measured, allowing for analysis of the shape of scattering particles, determination of their concentration, and determination of optical anisotropy.

В настоящее время исследование рассеяния света в мутных жидких средах связано с широким спектром приложений в различных областях. Анализ мутных сред помогает в разработке неинвазивных методов мониторинга концентрации глюкозы, белка и липидов в крови [1, 2]. Неразрушающий характер и высокая чувствительность к различению нормальной и опухолевой ткани делают поляризметрию перспективным направлением в диагностической медицине [3 - 5].

Целью данной исследовательской работы является изучение применимости математического аппарата Стокса–Мюллера для определения концентрации рассеивающих частиц в жидких мутных средах и одновременного анализа оптической анизотропии. Измерение индикатриссы рассеяния и определение функции распределения по размерам позволит оценить достоверность метода путём сравнения с

результатами, полученными на стандартных образцах с известными параметрами. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. Пропуская излучение с различными состояниями поляризации, можно получить данные, достаточные для расчёта матрицы Мюллера, полностью описывающей светорассеивающие свойства среды.

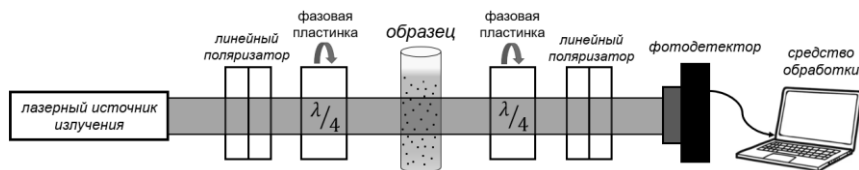


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Для анализа сферичности частиц глины и оксида кремния, а также для последующего построения функции распределения по размерам были получены микроскопические изображения образцов (рис. 2 и 3).

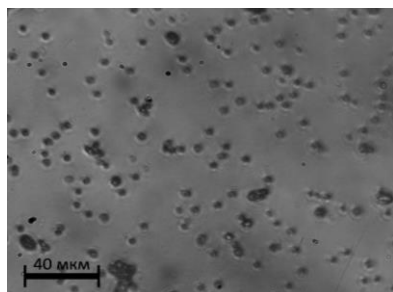


Рис. 2. Изображение частиц глины

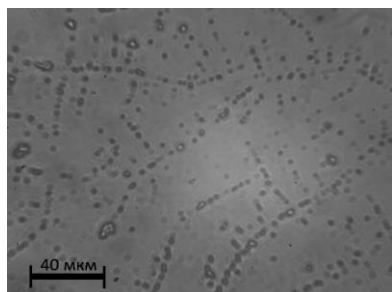


Рис. 3. Изображение частиц оксида кремния

Из морфологии образцов видно, что большинство частиц глины и оксида кремния имеют сферическую форму, удовлетворяющую требованиям теории Ми. Некоторые частицы, имеющие вытянутую форму, потребуют использование аппроксимации эллипсом.

#### Список литературы

1. Li D., Xu C., Zhang M. // Biomed. Opt. 2021. V. 12 (14). P. 2447-2459.
2. Kunnen B., Macdonald C., et al. // J. Biophotonics. 2014. V. 8 (4). P. 317-323.
3. Fernandez-Perez A., Gutierrez-Saiz O., et al. // J. Applied Sciences. 2019. V. 9 (14). P. 2886.
4. Ahmad I., Ahmad M., Khan K., et al. // J. Biomed. Opt. 2015. V. 20 (5). P. 58-67.
5. Pierangelo A., Benali A., Antonelli M.R., et al. // Opt.ics Express. 2011. V. 19. P. 1582-1593.

С.И. ХАЛИЛОВ, М.В. БРЕЦЬКО, С.И. ЯКУБОВ,  
Д.В. МАКСИМОВ, С.Н. ЛАПАЕВА

*Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь*

## **ПРЯМОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ОРБИТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТОКСА**

Представлен метод прямого измерения орбитальных параметров Стокса структурированных пучков. По аналогии с поляризметрией используется астигматическое преобразование цилиндрической линзой и вычисление моментов интенсивности второго порядка. Параметры  $S_1$ ,  $S_2$  и  $S_3$  восстанавливаются по двум распределениям интенсивности без измерения модового спектра, что обеспечивает прямое экспериментальное определение орбитального состояния и орбитального углового момента пучка.

S.I. KHALILOV, M.V. BRETSCO, S.I. YAKUBOV,  
D.V. MAKSIMOV, S.N. LAPAEVA

*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol*

## **DIRECT MEASUREMENT OF STOKES ORBITAL PARAMETERS**

A method for direct measurement of the orbital Stokes parameters of structured beams is presented. By analogy with polarimetry, an astigmatic transformation produced by a cylindrical lens is employed, and second-order intensity moments are evaluated. The parameters  $S_1$ ,  $S_2$  and  $S_3$  are retrieved from two intensity distributions without measuring the modal spectrum, enabling a direct experimental determination of the orbital state and orbital angular momentum of the beam.

Прямое измерение орбитальных параметров Стокса реализуется, следуя поляриметрической схеме измерений [1]. Цилиндрическая линза, подобно четвертьволновой пластинке, вводит астигматизм, где создается разность фаз Гуи между ортогональными осями. А роль поляризатора выполняет анализ моментов интенсивности второго порядка  $W_{xx}$ ,  $W_{yy}$  и  $W_{xy}$ . Для эксперимента достаточно двух снимков распределения интенсивности пучка: перед цилиндрической линзой  $z = 0$  и в плоскости её двойного фокуса  $z = 2f$  как показано на рис. 1а, при согласовании длины Рэлея  $z_0 = 2f_{CL}$  [2].

По первому кадру вычисляются первые два орбитальных параметра Стокса  $S_1$  и  $S_2$ :

$$S_1 = W_{xx}(z=0) - W_{yy}(z=0) = \frac{1}{J_0} \int_{\square} (x^2 - y^2) I(x, y, z=0) dx dy, \quad (1)$$

$$S_2 = W_{xy}(z=0) - W_{yx}(z=0) = \frac{1}{J_0} \int_{\square} [(x+y)^2 - (x-y)^2] I(x, y, z=0) dx dy, \quad (2)$$

где  $J_0$  – полная интенсивность пучка.

Третий параметр Стокса  $S_3$  рассчитывается по второму кадру, сделанному в двойном фокусе цилиндрической линзы. Благодаря принципу взаимности [2] между орбитальным угловым моментом (ОУМ)  $\ell_z$  пучка и недиагональным моментом  $W_{xy}$  в плоскости  $2f_{CL}$  получаем:

$$S_3 \equiv \ell_z = 4 \left( \frac{W_{xy}(z=2f_{CL})}{W_{yx}(z=2f_{CL})} \right) = \frac{4}{J_0} \int_{\square} \left( \frac{(x+y)^2}{(x-y)^2} \right) I(x, y, z=2f_{CL}) dx dy. \quad (3)$$

Таким образом, вектор  $(S_1, S_2, S_3)$  определяется по двум распределениям интенсивности без измерения модового спектра, что позволяет напрямую экспериментально определять орбитальное состояние и ОУМ структурированных Лагерр–Гауссовых (сЛГ) пучков на орбитальной сфере Пуанкаре, как показано на рис. 1б.

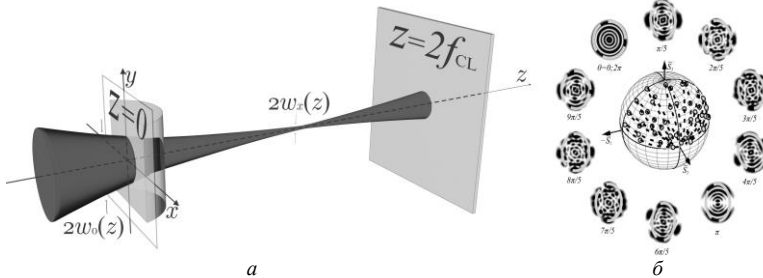


Рис. 1. Оптическая схема прямого измерения орбитальных параметров Стокса (а) и орбитальная сфера Пуанкаре (б), с экспериментально восстановленной траекторией сЛГ пучка с параметрами  $n = 4$ ,  $\ell = 1$ ,  $\varepsilon = 1$

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект №24-22-00278).

#### Список литературы

1. Dennis M.R. // Optics Communications. 2002. V. 213 (4-6). P. 201-221.
2. Volyar A.V., Bretsko M.V., et al. // Photonics. 2024. V. 11(11). P. 1095.

А.Ю. ОСИЧЕВА, Д.В. СЫЧ<sup>1</sup>

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

<sup>1</sup>*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

## **ПОЛУЧЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРА СТОКСА В МЕТОДЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННО- ЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ОДНОПИКСЕЛЬНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ**

В работе предложена концепция поляризационно-чувствительной вычислительной однопиксельной визуализации. Экспериментально получены изображения с пространственным распределением параметра Стокса.

A.Yu. OSICHEVA, D.V. SYCH<sup>1</sup>

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

<sup>1</sup>*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

## **ACQUISITION OF SPATIAL DISTRIBUTION OF A STOKES PARAMETER VIA POLARIZATION-SENSITIVE COMPUTATIONAL SINGLE-PIXEL IMAGING**

We propose the concept of polarization-sensitive computational single-pixel imaging. We experimentally obtain images with the spatial distribution of a Stokes parameter.

Целью данной работы является получение поляризационно-чувствительного изображения с пространственным распределением параметра Стокса. Для этого применяется подход на основе вычислительной однопиксельной визуализации [1], который состоит в использовании последовательности пространственно-неоднородных световых паттернов  $P_{ik}$  и фотодетектора без пространственного разрешения, измеряющего последовательность сигналов  $S_k$ . Вычисляемое изображение может быть получено как  $I_i = \sum_{k=1}^N P_{ik}^{-1} S_k$ , где  $i$  – одномерный индекс, который параметризует двумерное распределение интенсивности света  $W_{xy}$  с координатами пикселей  $(x, y)$  в построчном порядке. Для получения информации о поляризации мы используем линейный поляризационный фильтр с изменяемой ориентацией (горизонтальная  $H$  и вертикальная  $V$ ). Тогда

пространственное распределение параметра Стокса может получено

$$Q_{xy} = W_{xy}^{(H)} - W_{xy}^{(V)}.$$


Рис. 1. Схема поляризационно-чувствительной камеры

Схематичное изображение экспериментальной реализации поляризационно-чувствительной однопиксельной камеры показано на рис. 1. Свет от объекта фокусируется на плоскости пространственного модулятора света, который отображает световые паттерны. Часть света от объекта, соответствующая световому паттерну, проходит через поляризатор и измеряется фотодетектором. Далее сигнал оцифровывается и передается на компьютер, где восстанавливается изображение.

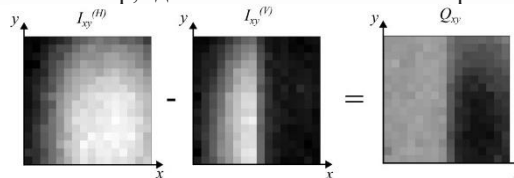


Рис. 2. Пример получения пространственного распределения поляризации, более тёмный цвет соответствует большему значению компоненты Стокса

Пример экспериментально полученного пространственного распределения компоненты Стокса  $Q_{xy}$  для двух ортогональных линейных компонент поляризации представлен на рис. 2. На двух изображениях слева отображены интенсивности света  $W_{xy}^{(H)}$  и  $W_{xy}^{(V)}$ , полученные с использованием двух ортогональных поляризаторов, а на изображении справа показано пространственное распределение компоненты Стокса  $Q_{xy}$  с перенормировкой в диапазон от 0 до 1 (чем больше значение, тем темнее цвет).

#### Список литературы

1. Osicheva A., Sych D. // Sensors. 2024. V. 24. P. 4689.

С.И. ЯКУБОВ, Д.В. МАКСИМОВ, С.Н. ЛАПАЕВА,  
С.И. ХАЛИЛОВ, М.В. БРЕЦЬКО

*Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь*

## **СЕКТОРНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ ВЕКТОРНЫХ ПУЧКОВ С ПОЛЯРИЗАЦИОННЫМИ С-ТОЧКАМИ**

В работе рассмотрено влияние секторного возмущения на поляризационные сингулярности типа «лимон» и «звезда». Проведено численное моделирование и экспериментальное исследование распределения поляризации вдоль оси распространения при секторном возмущении. Методом Стокс-поляризметрии показано, что С-точки проявляют способность к частичному восстановлению поляризационной картины, но степень восстановления резко уменьшается при росте угловой ширины дефекта.

S.I. YAKUBOV, D.V. MAKSIMOV, S.N. LAPAEVA,  
S.I. KHALILOV, M.V. BRETSKO

*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol*

## **SECTOR PERTURBATIONS OF VECTOR BEAMS WITH POLARIZATION C-POINTS**

This paper examines the influence of a sector perturbation on lemon and star shaped polarization singularities. Numerical modeling and an experimental study of the polarization distribution along the propagation axis under a sector perturbation are conducted. Stokes polarimetry demonstrates that C-points exhibit the ability to partially reconstruct the polarization pattern, but the degree of reconstruction decreases sharply as the angular width of the defect increases.

Поляризационные сингулярности типа «лимон» и «звезда» представляют собой С-точки в векторных пучках [1] и играют важную роль в задачах оптической связи, сенсорики и формирования световых полей с контролируемой топологией [2]. В условиях реальных систем такие пучки могут испытывать нарушения азимутальной симметрии. Данный вопрос хорошо исследован для скалярных сингулярных пучков [3], вопрос устойчивости описан подробно, тогда как пучки с векторными С-точками подробно экспериментально не исследовались.

Векторные пучки формировались путём сложения двух ортогонально циркулярно поляризованных компонент [4]. Топологические заряды компонент и фазовый сдвиг между ними, определяли тип создаваемой



С-точки. Такая схема позволяет получить устойчивые структуры поляризации вблизи оси пучка и контролировать направление вращения ориентации эллипсов поляризации.

Влияние секторных возмущений изучалось для четырёх угловых значений: 22,5, 45, 90 и 180°, на расстоянии 1 м от плоскости внесения секторного экрана. При угле сектора возмущения 22,5° структура в центральной области частично восстанавливается (рис. 1а) за счёт дифракционного перезаполнения сектора и перераспределения энергии, обусловленного орбитальным моментом пучка. При секторе возмущения 45 и 90°, степень восстановления существенно падает (рис. 1б, в), даже в центре поляризационная картина заметно искажается. Наибольшая деформация наблюдается при секторе 180°, где глобальная поляризационная структура нарушается существенно, а исходная поляризационная структура С-точки полностью разрушается (рис. 1г).

Анализ тонкой структуры дифрагированного пучка вдоль оси распространения проводился методом Стокс-поляриметрии и показывает, что С-точки проявляют способность к частичному восстановлению поляризационной картины, но степень восстановления резко уменьшается при росте угловой ширины дефекта. Эти результаты важны для понимания помехоустойчивости структурированных векторных пучков и могут быть использованы при проектировании оптических систем, работающих в условиях частичной апертурной обструкции.

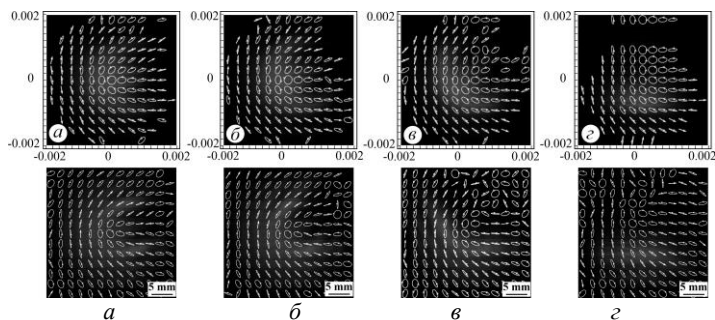


Рис. 1. Распределение эллипсов поляризации векторных пучков с С-точкой типа «лимон» (а – г): верхний ряд – теория, нижний – эксперимент

#### Список литературы

1. Angelsky O.V., Mokhun I.I., et al. // *Frontiers in Physics*. 2023. V. 11.
2. Chen S., Chen J., Xia T., et al. // *Advanced Photonics*. 2025. V. 7. No. 4. P. 044001.
3. Якубов С.И., Максимов Д.В. и др. // *Фотоника и информационная оптика*. 2025. С. 658.
4. Волярь А.В., Брецко М.В. и др. // *Компьютерная оптика*. 2019. Т. 43. № 5. С. 723-734.

О.В. ШАКИН<sup>1,4</sup>, В.И. КАЗАКОВ<sup>1</sup>, А.Р. БЕСТУГИН<sup>1</sup>, В.Н. БЕЛЫЙ<sup>2</sup>,  
П.И. РОПОТ<sup>2</sup>, Г.В. КУЛАК<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

<sup>2</sup>*Институт физики НАН Беларуси, Минск*

<sup>3</sup>*Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина, Беларусь*

<sup>4</sup>*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург*

## **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО СКАНИРОВАНИЯ КВАЗИБЕЗДИФРАКЦИОННЫХ ПУЧКОВ**

Представлены экспериментальные результаты исследования эффективности акустооптического сканирования традиционных гауссовых и квазибездифракционных бesselевых пучков. Установлена важная особенность пространственного сканирования квазибездифракционного (бesselева) пучка – превышение на порядок числа разрешимых положений по сравнению с гауссовыми пучками.

O.V. SHAKIN<sup>1,4</sup>, V.I. KAZAKOV<sup>1</sup>, A.R. BESTUGIN<sup>1</sup>, V.N. BELYI<sup>2</sup>,  
P.I. ROPOT<sup>2</sup>, G.V. KULAK<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

<sup>2</sup>*Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk*

<sup>3</sup>*Mozyr State Pedagogical University named after I.P. Shamyakin, Belarus*

<sup>4</sup>*Ioffe Institute of the RAS, Saint Petersburg*

## **EFFICIENCY ESTIMATION OF ACOUSTO-OPTICAL SPATIAL SCANNING OF QUASI-DIFFRACTION-FREE BEAMS**

Experimental results of a study on the efficiency of acousto-optic scanning of traditional Gaussian and quasi-diffraction-free Bessel beams are presented. An important feature of spatial scanning of quasi-diffraction-free (Bessel) beams is established: an order of magnitude greater number of resolvable positions compared to Gaussian beams.

Бesselевы световые пучки (БСП) являются одним из наиболее перспективных направлений исследований в области фотоники и имеют как фундаментальный, так и прикладной интерес [1 - 3].

В работе были проведены экспериментальные исследования по оценке эффективности пространственного сканирования БСП акустооптическим дефлектором. Схема эксперимента показана на рис. 1. Особый интерес

представляло получение результатов, позволяющих оценить преимущества БСП по сравнению с традиционными гауссовыми. В состав стенда вошли: 1 – лазер; 2 – ромб Френеля; 3 – расширитель пучка; 4 – аксикон; 5 – акустооптический дефлектор на  $\text{TeO}_2$  и генератор-синтезатор частот; 6 – ПК; 7 – экран/измеритель мощности.

Установлено (рис. 2), что для БСП диапазон сканирования с высокой эффективностью дифракции составляет около 10 МГц (в диапазоне 70 - 80 МГц). При этом важная особенность при управлении параметрами БСП: уменьшение полосы сканирования не приводит к ухудшению числа разрешимых положений, поскольку для дефлектора БСП это число определяется отношением интервала сканирования к диаметру сфокусированного пучка.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Союзного государства «Компонент-Ф» (НИР «Шифр Бессель РФ и РБ – ГУАП»).

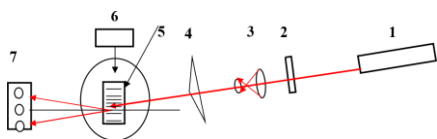


Рис. 1. Схема экспериментальной установки



Рис. 2. Результаты эксперимента

#### Список литературы

1. Bandres M.A., Gutierrez-Vega J.C. Airy-Gauss beams and their transformation by paraxial optical systems // Optics Express. 2007. V. 15. No. 25. P. 16727-16736.
2. Herman R.M., Wiggins T.A. Production and uses of diffractionless beams // J. Opt. Soc. Am. 1991. V. 8. No. 6. P. 932-942.
3. Ропот П.И., Агашков А.В., Варанецкий А.М., Казаков В.И., Шакин О.В., Акимов С.В. Формирование и двухкоординатное сканирование бессель-гауссова пучка акустооптическими ячейками на кристаллах парателлурита // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2025. Т. 23. № 4. С. 49-56.

В.С. ЩЕРБАКОВА, А.И. ЧИЖИКОВ, К.Б. ЮШКОВ,  
В.Я. МОЛЧАНОВ

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,  
Москва*

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТООПТИЧЕСКИХ МОДУЛЯТОРОВ С КЛИНОВИДНЫМ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ**

Проведено экспериментальное исследование по расширению относительной частотной полосы пьезопреобразователя акустооптических устройств с помощью клиновидных пьезопластин в сравнении с аналогичным плоским пьезопреобразователем. Разработан и изготовлен акустооптический элемент с клиновидным пьезопреобразователем из ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ) на базе акустооптического модулятора из кристаллического кварца ( $\text{SiO}_2$ ). Приведены результаты измерений исследованной конфигурации акустооптического элемента.

V.S. SCHERBAKOVA, A.I. CHIZHIKOV, K.B. YUSHKOV,  
V.Ya. MOLCHANOV

*National Research Technological University MISIS, Moscow*

## **EXPERIMENTAL RESEARCH OF ACOUSTO-OPTIC MODULATORS WITH THE CUNEAL PIEZOELECTRIC TRANSDUCER**

Experimental research was conducted to expand the relative frequency band of the piezoelectric transducer of acousto-optic devices using cuneal piezoelectric plates in comparison with a similar flat piezoelectric transducer. The acousto-optic element with the cuneal piezoelectric transducer made of lithium niobate ( $\text{LiNbO}_3$ ) based on an acousto-optic modulator made of crystalline quartz ( $\text{SiO}_2$ ) has been designed and manufactured. The results of measurements of the studied configuration of the acousto-optic element are presented.

Известно, что одним из способов увеличения полосы рабочих частот нагруженного пьезопреобразователя является использование неоднородных по толщине пьезопластин. Было опубликовано несколько теоретических работ с рассмотрением одномерной модели и с использованием аналитических выражений, ранее выведенных для плоскопараллельного случая: [1 - 5]. Недостатком рассмотренной в данных работах одномерной модели является невозможность учёта

краевых эффектов и паразитных акустических мод (как объёмных, так и поверхностных). Чтобы сделать вывод о перспективности практического применения неоднородных пьезопреобразователей, необходимо дополнить имеющуюся теоретическую картину описания клиновидных пьезопреобразователей экспериментальным исследованием.

Для данного исследования был разработан и изготовлен акустооптический элемент с клиновидным пьезопреобразователем из ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ) на базе акустооптического модулятора из кристаллического кварца ( $\text{SiO}_2$ ). Акустооптический элемент имел две пьезопластины, одна из которых была выполнена клиновидной и разделена на три секции различной толщины (31, 48 и 64 мкм), а вторая была выполнена плоскопараллельной. Референтная плоскопараллельная пластина имеет толщину 62 мкм и центральную частоту  $f_0 = 51$  МГц. Резонансные частоты секций клиновидной пьезопластины различны и обратно пропорциональны средней толщине секций. Секция 31 мкм имеет центральную частоту  $f_0 = 106$  МГц, секция 48 мкм –  $f_0 = 70$  МГц, секция 64 мкм –  $f_0 = 47$  МГц.

Для каждой секции клиновидного пьезопреобразователя была получена диаграмма комплексных импедансов (диаграмма Смита) и график зависимости коэффициента стоячей волны от частоты, используя векторный анализатор цепей Agilent Technologies E5061A. По полученным данным определена нормированная полоса возбуждения ультразвука. Наибольшее уширение полосы наблюдается для секций 48 и 31 мкм, поскольку для них относительная величина клиновидности максимальна.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что для исследованной конфигурации акустооптического элемента использование клиновидных пьезопластин позволило достичь расширения относительной частотной полосы пьезопреобразователя в сравнении с аналогичным плоским пьезопреобразователем на 24 %.

#### *Список литературы*

1. Jayet Y., et al. // IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics, 1985. V. 32, No. 6, P. 835-839.
2. Germain L., Cheeke J.N. // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 1993. V. 40, No. 2, P. 140.
3. Вострикова А.Н., Балакший В.И. // Изв. РАН, сер. физ. 2006. Т. 70. № 12. С. 1726-1730.
4. Balakshy V.I., Linde B.B., Vostrikova A.N. // Ultrasonics. 2008, V. 48. No. 5. P. 351.
5. Balakshy V.I., Revenko A.V. // Acta Acustica united with Acustica. 2010. V. 96. No. 5. P. 837.

В.В. ШИПКО<sup>1,2</sup>, О.С. ТРОШИН<sup>1</sup>, Я.В. ПЕТРОСЯН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, Воронеж

<sup>2</sup>Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

## **МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЗАИМНЫХ ИСКАЖЕНИЙ РАЗНОСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ФОРМИРУЕМЫХ АКУСТООПТИЧЕСКОЙ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ АППАРАТУРОЙ**

Предложена методика моделирования взаимных геометрических искажений разноспектральных изображений, формируемых акустooптической гиперспектральной аппаратурой, установленной на беспилотном летательном аппарате. Методика основана на трассировке лучей и проективных преобразованиях, учитывает угловые отклонения БПЛА по крену, тангажу и рысканию, а также конструктивные параметры камеры. Позволяет формировать синтетический датасет для тестирования алгоритмов коррекции искажений.

V.V. SHIPKO<sup>1,2</sup>, O.S. TROSHIN<sup>1</sup>, Ya.V. PETROSYAN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Air Forces Academy named after Prof. N.E. Zhukovskiy and Yu.A. Gagarin, Voronezh

<sup>2</sup>Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow

## **METHOD FOR MODELING MUTUAL DISTORTIONS OF MULTISPECTRAL IMAGES FORMED BY ACOUSTO-OPTIC HYPERSPECTRAL EQUIPMENT**

A method for modeling mutual geometric distortions of multispectral images formed by acousto-optic hyperspectral equipment installed on an unmanned aerial vehicle is proposed. The method is based on ray tracing and projective transformations, takes into account UAV angular deviations in roll, pitch, and yaw, as well as camera design parameters. Allows generating a synthetic dataset for testing distortion correction algorithms.

Существующие образцы акустooптической гиперспектральной аппаратуры возможно применять в задачах дистанционного зондирования Земли с борта беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [1]. Однако последовательная регистрация кадров в различных спектральных диапазонах в условиях угловых колебаний БПЛА приводит к возникновению взаимных геометрических искажений между разноспектральными изображениями. Существующие методы коррекции часто оказываются недостаточно эффективными для компенсации сложных перспективных искажений.

Целью работы является разработка методики моделирования взаимных искажений разноспектральных изображений, формируемых акустооптической гиперспектральной аппаратурой в условиях угловых колебаний БПЛА для дальнейшей апробации способов и алгоритмов коррекции таких искажений.

Основой разработанной методики является трассировка лучей из точки расположения камеры на плоскость цифровой модели местности. Методика включает следующие основные этапы.

1. Задание параметров съёмки: позиция камеры  $\vec{P}_0(x_0, y_0, z_0)$ ; углы (крен  $\gamma$ , тангаж  $\vartheta$ , рыскание  $\varphi$ ); углы поля зрения.

2. Вычисление направляющего вектора для каждого угла кадра. Направляющий вектор центрального луча определяется как:

$$\vec{d}(-\sin \gamma \cos \varphi + \sin \vartheta \sin \varphi, -\sin \gamma \sin \varphi - \sin \vartheta \cos \varphi, -\cos \gamma \cos \vartheta). \quad (1)$$

3. Определение границ обзора. Для каждого из четырёх углов кадра вычисляются координаты точек пересечения на плоскости, которые образуют четырёхугольники.

4. Построение проекции используя найденные координаты.

5. Отображение найденного четырёхугольника области обзора в прямоугольник с разрешением матрицы камеры  $I \times J$  пикселей с использованием проективного преобразования [2].

$$\begin{bmatrix} h_0 \\ h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \\ h_6 \\ h_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{0x} & a_{0y} & 1 & 0 & 0 & 0 & -a_{0x} \cdot b_{0x} & -a_{0y} \cdot b_{0x} \\ a_{1x} & a_{1y} & 1 & 0 & 0 & 0 & -a_{1x} \cdot b_{1x} & -a_{1y} \cdot b_{1x} \\ a_{2x} & a_{2y} & 1 & 0 & 0 & 0 & -a_{2x} \cdot b_{2x} & -a_{2y} \cdot b_{2x} \\ a_{3x} & a_{3y} & 1 & 0 & 0 & 0 & -a_{3x} \cdot b_{3x} & -a_{3y} \cdot b_{3x} \\ 0 & 0 & 0 & a_{0x} & a_{0y} & 1 & -a_{0x} \cdot b_{0y} & -a_{0y} \cdot b_{0y} \\ 0 & 0 & 0 & a_{1x} & a_{1y} & 1 & -a_{1x} \cdot b_{1y} & -a_{1y} \cdot b_{1y} \\ 0 & 0 & 0 & a_{2x} & a_{2y} & 1 & -a_{2x} \cdot b_{2y} & -a_{2y} \cdot b_{2y} \\ 0 & 0 & 0 & a_{3x} & a_{3y} & 1 & -a_{3x} \cdot b_{3y} & -a_{3y} \cdot b_{3y} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} b_{0x} \\ b_{1x} \\ b_{2x} \\ b_{3x} \\ b_{0y} \\ b_{1y} \\ b_{2y} \\ b_{3y} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где под  $a$  понимаются координаты трансформируемого пространства, а под  $b$  – базового. Координаты четырёхугольника базового изображения определяются размерами матрицы камеры ГСА.

Предложенная методика позволяет создать корректную проекцию аэрофотоснимка с учётом положения и ориентации БПЛА.

#### Список литературы

1. Пожар В.Э., Мачихин А.С., Гапонов М.И., Широков С.В., Мазур М.М., Шерышев А.Е. Гиперспектрометр на основе перестраиваемых акустооптических фильтров для БПЛА // Светотехника. 2018. № 4. С. 47-50.
2. Яне Б. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2007.

А.В. ТАЛАМАНОВА, Е.Ю. ЗЛОКАЗОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ В МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ДАННЫХ СЕНСОРОВ БЕСПИЛОТНЫХ АВТО НА ОСНОВЕ АРХИТЕКТУРЫ ТИПА ТРАНСФОРМЕР**

Данная работа посвящена обзору решений задачи детектирования объектов в данных лидара и камеры с помощью модели глубокого обучения типа трансформер. Приведён подробный обзор и систематический анализ существующих архитектур, выявляющий ключевые ограничения в обработке пространственно-временных корреляций между сенсорами. Определены перспективные направления поиска более точных решений задачи.

A.V. TALAMANOVA, E.Yu. ZLOKAZOV

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

## **OBJECT DETECTION IN MULTIMODAL SENSOR DATA OF AUTONOMOUS VEHICLES USING THE TRANSFORMER ARCHITECTURE**

This work is devoted to a review of solutions for the object detection task in lidar and camera data using a transformer-type deep learning model. A detailed overview and systematic analysis of existing architectures is provided, revealing key limitations in processing spatio-temporal correlations between sensors. Promising directions for finding more accurate solutions to the problem are identified.

Беспилотные системы достигли четвёртого уровня автономности, но проблемы точной интерпретации дорожной обстановки сохраняются. Ключевая задача — обнаружение объектов на основе мультимодальных данных, осложнённое различием форматов сенсоров, временными ограничениями и необходимостью детектирования мелких препятствий. Трансформерные архитектуры показывают передовые результаты в этой области. В работе проводится анализ таких архитектур для данных лидара и камеры, их сравнительная оценка и определение перспективных направлений развития.

Трансформерные архитектуры прогрессируют благодаря механизм кросс-модального внимания и единому представлению данных. Их преимущество — способность моделировать глобальные зависимости без



жёстких индуктивных предпосылок, характерных для свёрточных сетей, что достигается механизмом самовнимания.

Для оценки моделей используются стандартные метрики: Intersection over Union (IoU) и mean Average Precision (mAP). Последняя особенно важна для учёта дисбаланса классов в реальных сценариях.

TransFusion [1]: Двухэтапное слияние: детектирования на лидаре, затем уточнение трансформерным декодером через кросс-модальное внимание. Результат: 68.9 % mAP, но высокая вычислительная сложность.

BEVFusion [2]: Проекция данных камеры в вид с высоты птичьего полёта для создания единого представления. Баланс скорости (8.4 FPS) и точности (76.8 % mAP), но чувствительность к погрешностям калибровки.

UniTR [3]: Унифицированный трансформер для совместной обработки лидара, камеры и радара. Поддерживает мультизадачность (70.9 % mAP), но требует сложной оптимизации гиперпараметров.

DeepInteraction [4]: Независимые кодировщики обмениваются контекстом через двунаправленное внимание. Результат: 75.7 % mAP, но ресурсоёмкость и критика к точности карт глубины.

BEVFusion показывает наивысший mAP, что указывает на перспективность её модификации. Для прогресса необходимо улучшать не только количественные результаты, но и качество детектирования, особенно для небольших объектов (неровности, элементы инфраструктуры) в будущих датасетах. Также перспективно заимствование идеи асимметричной дистилляции знаний из архитектуры CMDFusion, разработанной для семантической сегментации и внедрение элементов графовых нейронных сетей в трансформер для явного моделирования связей между объектами в сцене.

Обзор современных методов на основе трансформеров показывает значительный прогресс в детектировании объектов по данным лидара и камеры. Дальнейшее количественное и качественное улучшение результатов возможно, в частности, через использование предложенных идей интеграции дистилляции знаний и графовых подходов.

#### *Список литературы*

1. Bai X., Hu Z., Zhu X., Huang Q., Chen Y., Fu H., Tai C.-L. TransFusion: Robust LiDAR-Camera Fusion for 3D Object Detection With Transformers // CVPR 2022.
2. Liu Z., Tang H., Amini A., Yang X., Mao H., Rus D.L., Han S. BEVFusion: Multi-Task Multi-Sensor Fusion with Unified Bird's-Eye View Representation // ICRA 2023.
3. Wang Y., Guizilini V., Zhang T., Yang Y., Zhao H. UniTR: A Unified and Efficient Multi-Modal Transformer for Bird's-Eye-View Representation // ICCV 2023.
4. Wang Y., Mao H., Chen Y., Wang D., Yang X., Liu Z., Zhou D. DeepInteraction: 3D Object Detection via Modality Interaction // NeurIPS 2022.

А.С. КАЛАШНИКОВА<sup>1,2</sup>, Д.В. СЫЧ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,  
Москва*

<sup>2</sup>*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

## **АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ BB84 С СОСТОЯНИЯМИ- ЛОВУШКАМИ ПРИ НАЛИЧИИ ВРЕМЕННОГО ПОБОЧНОГО КАНАЛА ХРОМАТИЧЕСКОЙ ДИСПЕРСИИ**

В работе проводится расчёт скорости генерации секретного ключа в протоколе BB84 с состояниями-ловушками квантового распределения ключей. Анализ выполняется с учётом влияния побочного временного канала, связанного с параметрами хроматической дисперсии, ширины оптических импульсов и их спектрального состава для различных состояний.

A.S. KALASNIKOVA<sup>1,2</sup>, D.V. SYCH<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*National Research Technological University «MISiS», Moscow*

<sup>2</sup>*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

## **SECURITY ANALYSIS OF BB84 WITH DECOY STATES WITH RESPECT TO TEMPORAL SIDE CHANNEL CAUSED BY CHROMATIC DISPERSION**

This work presents calculation of the secret key generation rate in a quantum key distribution protocol. The analysis is performed taking into account the influence of a temporal side channel related to the parameters of chromatic dispersion, optical pulse width, and their spectral composition for different states.

Несмотря на то, что теоретическая безопасность квантового распределения ключей обеспечена законами квантовой физики, его практическая реализация уязвима для атак через побочные каналы. Причиной возникновения таких каналов служат аппаратные несовершенства, которые создают утечку информации по степеням свободы, изначально не предназначенным для передачи данных, что может быть использовано злоумышленником (Евой) [1].

В работе выполнено математическое моделирование временного побочного канала, возникающего вследствие спектральной различимости состояний и различий в длительности оптических импульсов. Моделирование проводится в рамках формализма безопасности GLLP [2]; для оценки величины утечки информации используется подход, аналогичный модели в работе [3]. В качестве количественной меры различимости состояний применялся параметр фиделити.

Проведённый анализ показывает, что при заданных диапазонах вариации длины волны ( $\Delta\lambda = 0.020$  нм) и длительности импульса ( $\Delta\tau = 18$  пс) возникает характерное распределение состояний, визуализированные на представленных рис. 1 и 2. На графике показаны состояния после прохождения дистанций 100 км до компенсирующего волокна (случай 1) и сразу после него (случай 2), а также рассчитанная мера различимости между декой- и сигнальными состояниями составляет 60.05 % для первого случая и 51.36 % для второго случая. Как видно из графика на рис. 3, в результате моделирования были определены скорости генерации ключа для исследуемых сценариев.

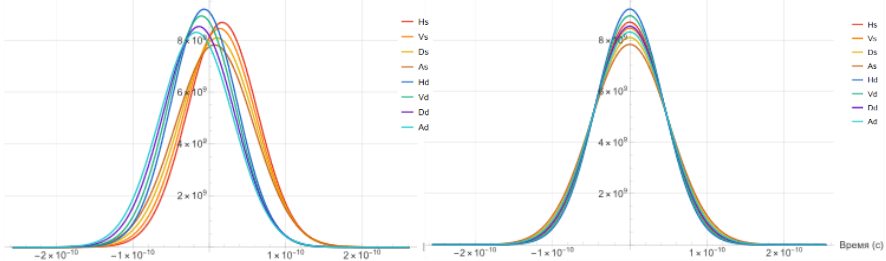


Рис. 1. Временной профиль для случая 1    Рис. 2. Временной профиль для случая 2

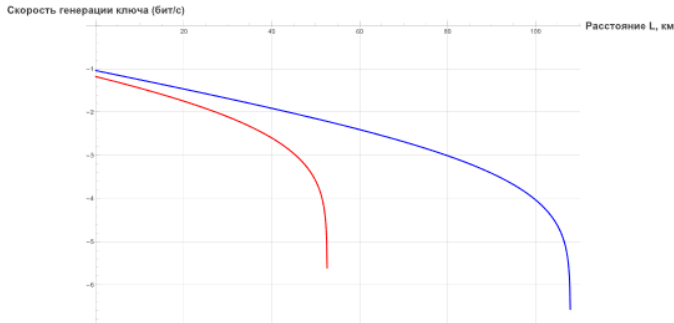


Рис. 3. График скорости генерации ключа для случаев использования компенсатора дисперсии (красный) и без компенсатора дисперсии (синий)

#### Список литературы

1. Miller A. Micius, the world's first quantum communication satellite, was hackable // arXiv preprint arXiv:2505.06532, 2025.
2. Gottesman D., Lo H.-K., Lütkenhaus N., Preskill J. Security of quantum key distribution with imperfect devices // arXiv:quant-ph/0212066. 2004.
3. Babukhin D.V., Sych D.V. Joint eavesdropping on the BB84 decoy state protocol with an arbitrary passive light-source side channel // arXiv:2211.13669 [quant-ph]. 2022).

А.Б. СОРОКИНА, Д.П. ЩЕРБИНИН  
*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА НА ЯЗЫКЕ PYTHON С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ТРЕКОВ ДВИЖЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ МИКРО- И НАНОЧАСТИЦ**

В работе представлены результаты разработки программного комплекса на языке Python для однозначного определения координат микро- и нанообъектов с применением методов машинного зрения и технологий искусственного интеллекта. Произведена разметка отснятого лабораторного видеоматериала с примерами движения заряженных микро- и наночастиц в электрических полях электродинамических ловушек. Разметка позволила определить набор параметров обработки изображений, необходимых для выявления треков частиц с помощью методов машинного зрения, включая фильтрацию, выравнивание фона, подавление шумов и усиление контрастности. В разработанный программный код интегрирована нейронная сеть, обученная автоматически применять к входным данным оптимальный набор ранее определённых параметров обработки изображений. По выявленным трекам движения частиц нейронная сеть выбирает параметры для однозначного восстановления координат частиц на каждом кадре. Таким образом, разработанный программный комплекс позволяет производить характеристику движения микро- и наночастиц для определения их физических параметров при движении в электрических полях электродинамических ловушек.

A.B. SOROKINA, D.P. SHCHERBININ  
*ITMO University, Saint Petersburg*

## **DEVELOPMENT OF A SOFTWARE PACKAGE IN PYTHON USING MACHINE VISION METHODS FOR DETECTING AND PROCESSING MOTION TRACKS OF CHARGED MICRO- AND NANOPARTICLES**

Here, we present a Python software package for the unambiguous determination of micro- and nano-object position using machine vision techniques and artificial intelligence approaches. We used the footage showing micro-nanoparticle motion in the electric fields of electrodynamic traps as a test data set. This video footage processing has allowed us to define a set of parameters necessary for identifying particle tracks using machine vision methods, such as filtering, background equalization, noise suppression, and contrast enhancement. In the developed software code, we integrate a neural network trained to automatically apply the optimal set of predetermined image

processing parameters to the input data. Based on the identified particle motion tracks, the neural network unambiguously reconstructs particle coordinates in each frame. Thus, the developed software package enables the characterization of micro- and nanoparticle motion to determine their physical parameters. The developed approach can be applied for parameter identification of particles trapped in the electric fields of electrodynamic traps.

В настоящее время методы машинного зрения широко применяются для решения задач в таких областях, как микроскопия, микробиология, микроэлектроника, дефектоскопия, левитирующая оптомеханика [1], а также для определения координат и траекторий микро- и наночастиц, что позволяет рассчитывать их физические параметры такие как размер, масса и заряд [2]. Целью данной работы является разработка программного обеспечения для автоматического выявления и анализа треков движения заряженных частиц в электрических полях электродинамических ловушек.

Программный комплекс реализован на языке Python с использованием библиотек OpenCV и NumPy, а также свёрточной нейронной сети. В качестве входных данных использовались видеозаписи лабораторных экспериментов, содержащие изображения частиц на фоне шумов и неоднородного фона. Для обучения нейронной сети [3] была выполнена разметка данных и определены наиболее часто используемые параметры обработки изображений: фильтрация, выравнивание фона, подавление шумов и усиление контрастности.

Нейронная сеть автоматически подбирает оптимальные параметры обработки, после чего выполняется бинаризация изображений, сегментация и выделение контуров треков частиц. Координаты центра частицы в кадре определяются на основе анализа формы трека и распределения интенсивности изображения. Качество работы алгоритма проверялось на лабораторных и открытых наборах данных путём сравнения исходных и бинаризованных изображений

Разработанный программный комплекс обеспечивает устойчивое обнаружение и обработку треков микро- и наночастиц и может быть использован в задачах левитирующей оптомеханики и смежных областях.

#### *Список литературы*

1. Darulis D., et al. Machine learned particle detector simulations // arXiv preprint arXiv:2207.11254. 2022.
2. Рождественский Ю.В. Электродинамические ловушки для микрочастиц: теория и практика. 2021.
3. Newby J.M., et al. Convolutional neural networks automate detection for tracking of submicron-scale particles in 2D and 3D // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2018. V. 115. No. 36. P. 9026-9031.

А.Ю. ШИХОВЦЕВ<sup>1</sup>, П.Г. КОВАДЛО<sup>1</sup>, А.А. ЛЕЖЕНИН<sup>1,2</sup>,  
М.Б. ДРИГА<sup>1</sup>, В.С. ГРАДОВ<sup>2</sup>

*<sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск*

*<sup>2</sup>Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,  
Новосибирск*

## **СТРУКТУРА АТМОСФЕРНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НАД БОЛЬШИМ СОЛНЕЧНЫМ ВАКУУМНЫМ ТЕЛЕСКОПОМ: ИЗМЕРЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ**

Приведены измеренные и расчётные вертикальные распределения интенсивности атмосферной оптической турбулентности (ОТ) над Большим солнечным вакуумным телескопом. Измерения основаны на обработке данных, полученных с помощью датчика Шака–Гартмана. Расчёт вертикальных профилей проводится с использованием схемы параметризации «характеристики ОТ – метеорологические характеристики». Рассмотрена возможность детализации вертикальных профилей ОТ с привлечением метеорологической модели WRF.

A.Yu. SHIKHOVTSEV<sup>1</sup>, P.G. KOVADLO<sup>1</sup>, A.A. LEZHENIN<sup>1,2</sup>,  
M.B. DRIGA<sup>1</sup>, V.S. GRADOV<sup>2</sup>

*<sup>1</sup>Institute of Solar-Terrestrial Physics of Siberian Branch of the RAS, Irkutsk*

*<sup>2</sup>Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics  
of Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk*

## **STRUCTURE OF ATMOSPHERIC OPTICAL TURBULENCE ABOVE THE LARGE SOLAR VACUUM TELESCOPE: MEASUREMENTS AND SIMULATION**

Measured and calculated vertical distributions of atmospheric optical turbulence (OT) over the Large Solar Vacuum Telescope are presented. The measurements are based on Shack–Hartmann sensor data. The vertical profiles are calculated using a parameterization scheme "OT characteristics – meteorological characteristics." The possibility of refining OT vertical profiles using the WRF meteorological model is discussed.

Атмосферная оптическая турбулентность (ОТ) – это явление, которое ассоциируется с формированием мелкомасштабных турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха по лучу зрения (астрономического телескопа). Вертикальное распределение ОТ

определяет флуктуации амплитуды и фазы световых волн на уровне апертуры телескопа и его разрешающую способность. Существует ряд методов измерения вертикальных распределений ОТ, среди которых можно отметить SLODAR, SCIDAR и S-DIMM+.

Цель работы состоит в тестировании разработанного метода измерений вертикальных профилей ОТ в скрещенных оптических пучках (построенного по аналогии с методом SLODAR) [1]. Схема и принцип измерений показаны на рис. 1. В основе оценки вертикальных профилей ОТ лежат данные измерений, полученные с помощью датчика Шака–Гартмана (ШГ), сопряжённого с апертурой телескопа. Пример измеренного вертикального распределения ОТ над Большим солнечным вакуумным телескопом (Иркутская область) показан на рис. 2. Дополнительно, обсуждаются возможности восстановления вертикальных профилей ОТ с привлечением моделирования. Приводятся результаты мезомасштабного моделирования (модель WRF) [2].

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-72-10043. Данные получены с использованием Уникальной научной установки «Большой солнечный вакуумный телескоп» (<http://ckp-rf.ru/usu/200615/>).

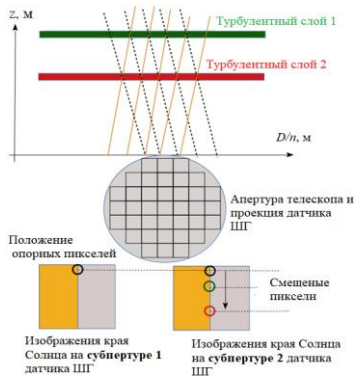


Рис. 1. Схема, демонстрирующая принцип, заложенный в метод измерений

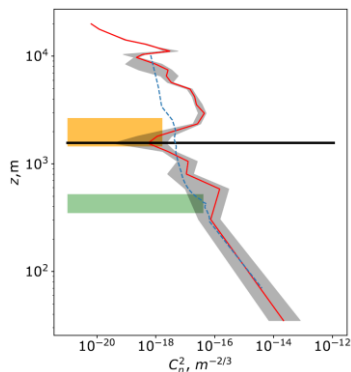


Рис. 2. Вертикальные распределения измеренной ОТ (синяя пунктирная линия) и моделируемой ОТ (красная линия)

#### Список литературы

1. Shikhovtsev A. Yu. // Optika atm. i okeana. 2025. V. 38 (7). P. 592-598.
2. Shikhovtsev A. Yu., Kovadlo P. G., et al. // Applied Sciences. 2023. V. 13 (3). P. 1282.

Е.Г. ЦИПЛАКОВА<sup>1,2</sup>, А.В. ЧЕРНЫХ<sup>1</sup>, А.С. ЕЗЕРСКИЙ<sup>1,2</sup>,  
И.И. РАКОВ<sup>3</sup>, Н.И. РАГИНОВ<sup>3</sup>, Д.В. КРАСНИКОВ<sup>3</sup>,  
А.В. РАДИВОН<sup>4</sup>, М.Г. БУРДАНОВА<sup>4,5</sup>, Н.В. ПЕТРОВ<sup>1,6</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>Харбинский инженерный университет, Китай

<sup>3</sup>Сколковский институт науки и технологий, Москва

<sup>4</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

<sup>5</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

<sup>6</sup>Харбинский политехнический университет, Китай

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ВИХРЕВЫХ ПУЧКОВ ЗА СЧЁТ ПЕРЕСТРОЙКИ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ СПИРАЛЬНЫХ ЗОННЫХ ПЛАСТИН В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Представлены результаты численного моделирования восстановления волнового фронта четырёхзарядного вихревого пучка на частоте 0,327 ТГц с использованием растяжимой спиральной зонной пластины. Показано, что перестройка фокусного расстояния пластины функционально эквивалентна продольному перемещению детектора и позволяет реконструировать амплитуду и фазу волнового фронта.

E.G. TSIPLAKOVA<sup>1,2</sup>, A.V. CHERNYKH<sup>1</sup>, A.S. EZERSKII<sup>1,2</sup>,  
I.I. RAKOV<sup>3</sup>, N.I. RAGINOV<sup>3</sup>, D.V. KRASNIKOV<sup>3</sup>, A.V. RADIVON<sup>4</sup>,  
M.G. BURDANOVA<sup>4,5</sup>, N.V. PETROV<sup>1,6</sup>

<sup>1</sup>ITMO University, Saint Petersburg

<sup>2</sup>Harbin Engineering University, China

<sup>3</sup>Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow

<sup>4</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

<sup>5</sup>Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

<sup>6</sup>Harbin Institute of Technology, China

## PHASE RETRIEVAL OF VORTEX BEAMS USING TUNABLE- FOCUS SPIRAL ZONE PLATES IN THE TERAHERTZ RANGE

This study presents the results of numerical simulation of the phase retrieval of a four-charge vortex beam at 0.327 THz using a stretchable spiral zone plate. It is shown that tuning the focal length of the plate is functionally equivalent to longitudinal detector translation and enables the reconstruction of the wavefront amplitude and phase.



Развитие приложений терагерцового (ТГц) диапазона в современных системах связи и визуализации требует создания эффективных устройств управления волновым фронтом. В настоящей работе исследуются перестраиваемые спиральные зонные пластины (СЗП) на основе углеродных нанотрубок, предназначенные для ТГц-диапазона и способные динамически изменять фокусное расстояние за счёт механического растяжения [1]. Для полной характеристики формируемых ими сложных полей, таких как вихревые пучки, необходимо восстановление фазы, информация о которой не известна при прямом детектировании интенсивности. Для решения этой проблемы в ТГц-диапазоне широко применяются итерационные алгоритмы восстановления фазы из интенсивности, такие как SBMIR (Single Beam Multiple Intensity Reconstruction) [2]. Они основаны на регистрации набора дифракционных картин в различных плоскостях, что в классической реализации предполагает медленное механическое сканирование.

Целью работы является разработка альтернативного подхода к восстановлению фазы ТГц-излучения, основанного на использовании возможности перестройки фокусного расстояния СЗП путём её растяжения. В численном моделировании исследуется СЗП с топологическим зарядом 4 на частоте 0,327 ТГц, соответствующей излучению лампы обратной волны. Для фиксированного положения детектора ( $z = 12$  мм) при изменении растяжения СЗП от 0 до 12 % с шагом 4 % получен набор распределений модуля комплексной амплитуды (рис. 1а-г). Этот набор использован для восстановления амплитуды и фазы вихревого пучка (рис. 1д, е). Эффективность подхода подтверждается сопоставлением с результатами восстановления фазы с помощью SBMIR и корректным расчётом спектра орбитального углового момента.

Авторы из Университета ИТМО выражают благодарность за финансовую поддержку Министерству науки и высшего образования Российской Федерации (№ FSER-2025-0007).

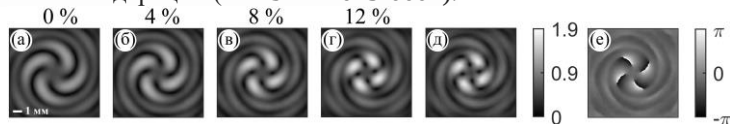


Рис. 1. Распределение модуля комплексной амплитуды на расстоянии 12 мм за СЗП при различной степени растяжения (а - г) и соответствующие восстановленные распределения амплитуды (д) и фазы (е)

#### Список литературы

1. Radivon A.V., et al. //Advanced Optical Materials. 2024. V. 12 (17). P. 2303282.
2. Pedrini G., et al. //Optics Letters. 2005. V. 30 (8). P. 833-835.

Л.А. МАКСИМОВА, Д.В. ЛЯКИН, Н.Ю. МЫСИНА, В.П. РЯБУХО  
*Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПРОДОЛЬНОЙ КОРРЕЛЯЦИИ СВЕТОВОГО ВОЛНОВОГО ПОЛЯ С ШИРОКИМИ УГЛОВЫМ И ЧАСТОТНЫМ СПЕКТРАМИ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Исследованы когерентные свойства стохастического во времени и в пространстве оптического волнового поля в направлении его распространения. Показано конкурирующее влияние на продольную когерентность ширин углового и частотного спектров поля. Выполнено сравнение результатов моделирования с результатами формальной теорией когерентности, которое показало их совпадение с большой точностью.

L.A. MAKSIMOVA, D.V. LYAKIN, N.Yu. MYSINA, V.P. RYABUKHO  
*Institute of Precision Mechanics and Control of the RAS, Saratov*

## **INVESTIGATION OF THE LONGITUDINAL CORRELATION OF A LIGHT WAVE FIELD WITH WIDE ANGULAR AND FREQUENCY SPECTRA BASED ON NUMERICAL SIMULATION**

The coherent properties of a stochastic optical wave field in time and space in the direction of its propagation are investigated. The competing influence on the longitudinal coherence of the widths of the angular and frequency spectra of the field is shown. The simulation results were compared with the results of the formal theory of coherence, which showed their agreement with high accuracy.

В работе выполнены исследования пространственных продольных корреляционных свойств стохастического волнового поля с широким угловым и частотным спектрами на основе корреляционного анализа распределения комплексной амплитуды поля в продольном направлении для ансамбля реализаций, сформированного с помощью численного моделирования. На рис. 1а, б представлены фрагменты смоделированных спекл-картин флуктуаций оптического волнового поля в продольном сечении  $XZ$ , относительно направления его распространения. На рис. 1а представлен фрагмент для квазимонохроматического волнового поля, а на рис. 1б – для поля с частотным спектром в шкале длин волн  $\Delta\lambda = 0,2$  мкм. Поле комплексных амплитуд  $E(x,y,z,t=0)$  формировалось как

суперпозиция плоских волн для всех составляющих частотного спектра поля со всевозможными пространственными частотами ( $k_{ix}, k_{iy}, k_{iz}$ ) в пределах углового спектра поля со случайными начальными фазами гармоник  $\varphi_0(k_{ix}, k_{iy})$  в диапазоне от 0 до  $2\pi$  рад. Подобные численные эксперименты по исследованию процессов формирования мгновенных спекл-структур и их корреляционных свойств в поперечном сечении волнового поля выполнены в [1, 2]. На основе смоделированных распределений комплексных амплитуд волнового поля, числом реализаций  $n = 500$ , построены графики функций корреляции поля в двух точках вдоль оси Z (рис. 1в).

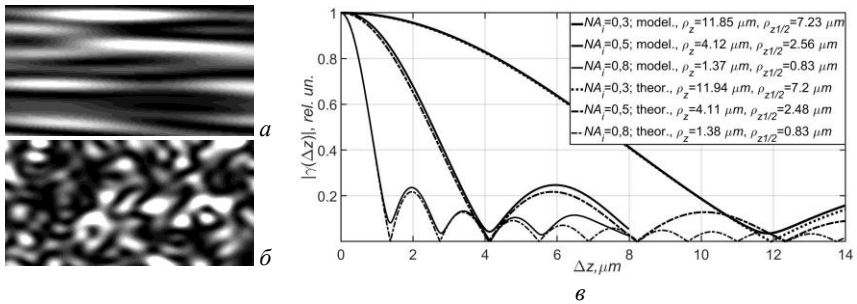


Рис. 1. Смоделированные фрагменты мгновенных спекл-структур в продольном сечении XZ волнового поля с числовой апертурой  $NA_i = 0,3$ , размер фрагментов  $10 \times 20$  мкм,  $1000 \times 2000$  пикс (а, б); функции продольной когерентности поля (в):  $\rho_z$  – длина продольной когерентности поля (координата первого минимума),  $\rho_{z1/2}$  – координата значения функции на высоте  $\max(|\gamma(\Delta z)|)/2$ ;  $\lambda_0 = 0,55$  мкм; ширина частотного спектра поля в шкале длин волн  $\Delta\lambda$ : а, в –  $0,001$  мкм; б –  $0,2$  мкм

В работе выполнено сравнение результатов моделирования с формальной теорией, которое показывает их совпадение с большой точностью. Исследования продольных корреляционных свойств стохастических волновых полей на основе компьютерного моделирования пространственных распределений комплексных амплитуд реализаций волнового поля показали свою эффективность и перспективность для использования в качестве альтернативы или дополнения натурному эксперименту.

#### Список литературы

1. Максимова Л.А., Лякин Д.В., Мысина Н.Ю., Рябухо В.П. // Журнал технической физики. 2025. Т. 95 (5). С. 989.
2. Максимова Л.А., Лякин Д.В., Мысина Н.Ю., Рябухо В.П. // Сб. научн. трудов: XIV Межд. конф. по фотонике и информ. оптике. М.: НИЯУ МИФИ. 2025. С. 701.

**В.А. КОМОЦКИЙ, А.Р. РАВИН**

*Российский университет дружбы народов им. П. Лумумбы, Москва*

## **ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКА УГЛОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ОСНОВЕ ГУБОКОЙ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЁТКИ**

Исследован датчик малых угловых колебаний нового типа, в основе которого лежит эффект дифракции лазерного пучка на отражательной дифракционной решётке (ДР), глубина рельефа которой составляет от половины до нескольких длин волн излучения лазера. Датчик линейно преобразует угловое отклонение ДР в изменение мощности нулевого порядка дифракции и далее в изменение тока фотодиода, размещённого в нулевом дифракционном порядке. Исследованы характеристики крутизны преобразования и диапазона линейности от глубины рельефа ДР. Проведены оценки порога чувствительности метода.

**V.A. KOMOTSKIИ, A.R. RAVIN**

*Patrice Lumumba Peoples Friendship University of Russia, Moscow*

## **CHARACTERISTICS OF ANGULAR VIBRATION SENSOR BASED ON DEEP REFLECTIVE DIFFRACTION GRATING**

A new type of small angular motion sensor has been studied, which is based on the diffraction of a laser beam on a reflective diffraction grating (DR), the relief depth of which is from half to several wavelengths of laser radiation. The sensor linearly converts the angular deviation of the DR into a change in power of zero diffraction order. The characteristics of the steepness of the transformation and the range of linearity from the depth of the DR relief were studied. The method sensitivity threshold was evaluated.

Схема датчика с применением уголкового отражателя изображена на рис. 1. Пучок излучения от лазера (1) направляется на рельефную отражательную дифракционную решётку (ДР) с прямоугольным профилем (2), показанным слева, затем отражается от зеркала (3), расположенного на второй плоскости уголкового отражателя. Пучок нулевого порядка дифракции, выделенный диафрагмой (4), направляется на фотодиод (5), с нагрузки которого снимается электрический сигнал, который при правильной настройке пропорционален угловому отклонению ДР относительно оси  $Ox$ .

Особенности дифракции лазерного пучка на глубоких отражательных ДР рассмотрены в [1]. Рекомендованное отношение  $\gamma$  глубины рельефа ДР  $h$

к длине волны излучения лазера  $\lambda$ , то есть  $\gamma = h/\lambda$ , составляет от  $\gamma = 1$  до  $\gamma = 4$ . Зависимость мощности излучения в нулевом порядке дифракции от угла падения пучка лазера на ДР при значении  $\gamma = 1,59$  приведена на рис. 2.

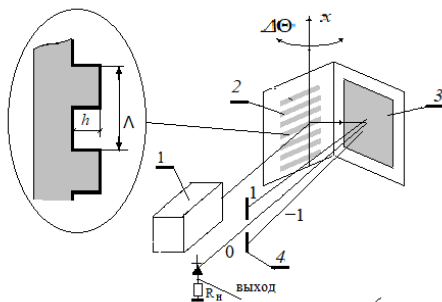


Рис. 1. Схема датчика колебаний на основе глубокой ДР

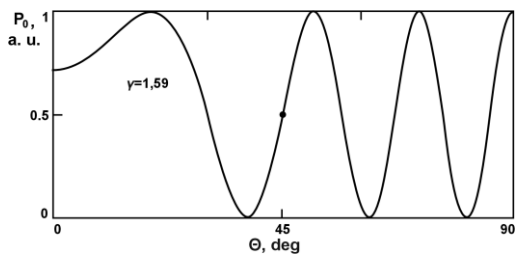


Рис. 2. Зависимость мощности в нулевом порядке от угла при  $\gamma = 1,59$

Проведённый эксперимент по оценке чувствительности датчика показал, что пороговое значение амплитуды колебаний датчика при отношении амплитуды сигнала к шуму составляло  $3 \cdot 10^{-5}$  радиан при полосе канала усиления 2 кГц. Измерения проводились на частоте колебаний 1 кГц. Измерения проводились при возбуждении колебаний пьезоэлектрическим вибратором.

#### Список литературы

1. Комоцкий В.А. // Радиотехника и электроника, 2024, том 69, № 11, с. 1099–1109.
2. Комоцкий В.А., Равин А.Р. Горизонтальный сейсмометр оптическим датчиком колебаний на основе глубокой фазовой отражательной дифракционной решётки. Патент № 237544 от 25.09.2025.

Н.Т. АВЛАСЕВИЧ, Ю.Р. БЕЙТЮК, А.М. ЛЯЛИКОВ  
*Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Беларусь*

**ФОРМИРОВАНИЕ ОПОРНЫХ ПОЛОС  
В ВОССТАНОВЛЕННЫХ ИНТЕРФЕРОГРАММАХ  
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДВУХЭКСПОЗИЦИОННОЙ  
ГОЛОГРАММЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ,  
ЗАПИСАННОЙ В НЕКОГЕРЕНТНОМ СВЕТЕ**

Установлено, что при восстановлении интерференционной картины вид опорных полос определяется не только разностью векторов решёток голографических структур, сформированных в моменты первой и второй экспозиции голограммы, но и положением в пространстве векторов опорной решётки и исследуемой периодической структуры. Приведены схематические изображения картин образования опорных полос в восстановленных интерференционных картинах.

N.T. AVLASEVICH, Yu.R. BEYTUK, A.M. LYALIKOV  
*Y. Kupala Grodno State University, Belarus*

**FORMATION OF REFERENCE BANDS  
IN RECONSTRUCTED INTERFEROGRAMS  
USING A TWO-EXPOSURE HOLOGRAM OF A PERIODIC  
STRUCTURE RECORDED IN INCOHERENT LIGHT**

It is established that when restoring the interference pattern, the appearance of the reference bands is determined not only by the difference in the lattice vectors of the holographic structures formed at the moments of the first and second exposure of the hologram, but also by the position in space of the lattice vectors of the reference lattice and the periodic structure under study. Schematic images of patterns of formation of reference bands in reconstructed interference patterns are presented.

Двухэкспозиционная голографическая интерферометрия, заключающаяся в формировании пары голограмм исследуемого объекта при различных его состояниях и восстановлении интерференционной картины, получила широкую популярность при исследовании фазовых и диффузно-отражающих объектов [1, 2].

Данная работа посвящена дальнейшему исследованию особенностей метода двухэкспозиционной интерферометрии, с использованием голограммы, записанной в некогерентном свете [3 - 5].

Ранее [5] были выявлены особенности в формировании опорных полос при восстановлении двухэкспозиционной голограммы периодической структуры. Было установлено, что ширина и ориентация опорных полос, определяемых вектором  $\mathbf{G}$  решётки, в восстановленной интерферограмме определяется разностью векторов  $(\mathbf{G}_1 - \mathbf{G}_2)$  решёток, сформированных голограмм первой и второй экспозиций. Однако было установлено, что ориентация данных векторов определяется как пространственным положением векторов  $\mathbf{P}$  опорной решётки и  $\mathbf{X}$  исследуемой периодической структуры, так и отношением  $\mathbf{P} / \mathbf{X}$  их модулей.

На рис. 1 схематически изображены примеры картин опорных полос и соответствующий им вектор решётки для нескольких вариантов записи двухэкспозиционной голограммы.

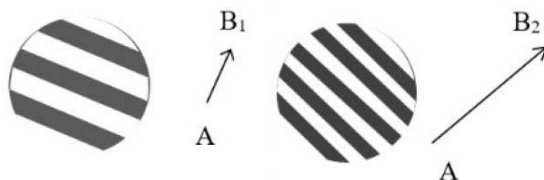


Рис. 1. Вид опорных полос и соответствующий им вектор решётки для двух вариантов записи двухэкспозиционной голограммы

Проведённый анализ особенностей формирования картины интерференционных полос, восстановленной с двухэкспозиционной голограммы периодической структуры, сформированной в устройстве записи голограмм периодических структур в некогерентном свете с дополнительной опорной решёткой, позволяет качественно оценить картину опорных полос, в частности, определить направление и период полос заранее, на этапе формирования двухэкспозиционной голограммы.

#### Список литературы

1. Бекетова А.К. и др. Голографическая интерферометрия фазовых объектов. Л.: Наука. 1979.
2. Вест Ч. Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982.
3. Ляликов А.М., Авласевич Н.Т. // Оптический журнал. 2019. Т. 86, № 3. С. 56-60.
4. Авласевич Н.Т., Ляликов А.М. // Проблемы физики, математики и техники. 2022. № 3. С. 7-12.
5. Авласевич Н.Т., Ляликов А.М. // XIII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сб. науч. тр. М.: НИЯУ МИФИ, 2024. С. 627-628.

В.А. ДОМАКОВА<sup>1</sup>, К.М. АРБУЗОВА<sup>1</sup>, Л. РАМОС-ВЕЛАСКЕС<sup>1,2</sup>,  
Д.А. СИНЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>ООО «Лазерный центр», Санкт-Петербург

## **СОЗДАНИЕ ВИЗУАЛЬНЫХ ЭФФЕКТОВ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТОНКИХ ПОКРЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ СТЕКОЛ, СТРУКТУРИРОВАННЫХ ЛАЗЕРНЫМИ МЕТОДАМИ**

В работе представлены результаты по созданию тонких структурированных покрытий на поверхности стекла комбинированным методом, включающим лазерно-индуцированный обратный перенос (ЛИОП) плёнки титана и последующее формирование на ней лазерно-индуцированных поверхностных периодических структур (ЛИППС). Показано, что на перенесённых плёнках формируются ЛИППС с периодом 0,72 мкм ( $\sim \lambda/n$ ). На основе установленных закономерностей были продемонстрированы визуальные эффекты, включая дифракционный цветовой отклик, динамические эффекты движения, переключения и объёма, что открывает новые возможности для создания защитных меток и художественных арт-объектов.

V.A. DOMAKOVA<sup>1</sup>, K.M. ARBUZOVA<sup>1</sup>, L. RAMOS-VELAZQUEZ<sup>1,2</sup>,  
D.A. SINEV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ITMO University, Saint-Petersburg

<sup>2</sup>Laser Center, Saint-Petersburg

## **CREATION OF VISUAL EFFECTS BASED ON METALLIC THIN FILMS ON GLASS SURFACES STRUCTURED BY LASER METHODS**

This work presents the results of creating thin structured films on a glass surface using a combined method involving laser-induced backward transfer (LIBT) of titanium and subsequent formation of laser-induced periodic surface structures (LIPSS) on the deposited film. It was shown that LIPSS with a period of 0.72  $\mu\text{m}$  ( $\sim \lambda/n$ ) are formed on the transferred films. Based on the established relationships, visual effects were demonstrated, including a diffraction color response, dynamic motion and switching effects, and a volumetric illusion, opening new possibilities for creating security marks and art objects.

Развитие методов лазерной маркировки прозрачных материалов является актуальной задачей в таких областях как микроэлектроника,



фармацевтика и производство защитных меток. Однако традиционные лазерные методы часто ограничены созданием одноцветных изображений. Перспективным направлением является формирование структурных цветов за счёт создания лазерно-индуцированных поверхностных периодических структур (ЛИППС) [1].

Целью работы являлось изучение процессов формирования и структурирования металлического покрытия на стекле при последовательной лазерной обработке в схемах ЛИОП и ЛИППС. Схема экспериментальной установки включала волоконный иттербиевый наносекундный лазер ( $\lambda = 1064$  нм,  $\tau = 4 - 200$  нс).

На основе метода была продемонстрирована возможность создания динамических визуальных эффектов. Управляя ориентацией линейной поляризации излучения в процессе записи [2], были получены эффекты «движения», «переключения» и «объёма», что принципиально расширяет возможности защитной маркировки. На основе этого был создан арт-объект с демонстрацией иллюзии объёма за счёт распределения элементов изображения по нескольким стеклянным пластинам, собранным в единую конструкцию (рис. 1).

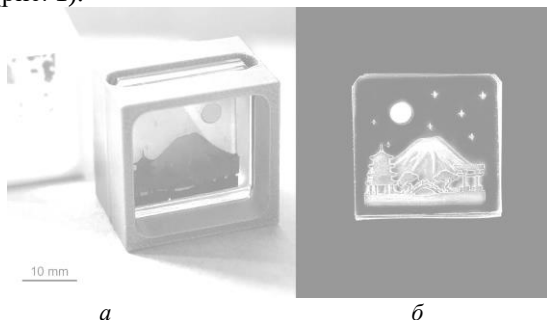


Рис. 1. Визуализация готового арт-объекта и демонстрация дифракционных свойств: внешний вид собранного оптического арт-объекта (а), вид на объект спереди при фиксированном угле освещения [2] (б)

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-79-10230, <https://rscf.ru/project/24-79-10230/>.

#### *Список литературы*

1. Avilova E.A., et al. New laser-based method for the structural coloring of glasses // Journal of Optical Technology. 2024. V. 91. No. 3. P. 164-169.
2. Domakova V.A., et al. Laser-Induced Backward Transfer and Laser-Induced Periodic Surface Structures: New Horizons for Visual Arts and Design // Journal of Laser Micro Nanoengineering. 2025. V. 20. No. 3. P. 297-301.

Н.М. ГАНЖЕРЛИ, С.Н. ГУЛЯЕВ<sup>1</sup>, И.А. МАУРЕР

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург*

*<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

## **ИСТОРИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЛОЁВ БИХРОМИРОВАННОГО ЖЕЛАТИНА В ГОЛОГРАФИИ**

Рассмотрены физико-химические свойства светочувствительных материалов на основе бихромированного желатина (БХЖ). Описаны химические и физико-химические процессы, происходящие в системе «желатин-вода» в ходе изготовления слоя и записи голограмм. Представлены разные технологии полива слоёв БХЖ, а также наиболее частые варианты их использования в голографии, такие как голограммные оптические элементы и изобразительные голограммы.

N.M. GANZHERLI, S.N. GULYAEV<sup>1</sup>, I.A. MAURER

*Ioffe Institute of the RAS, Saint Petersburg*

*<sup>1</sup>Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University*

## **THE HISTORY OF USING DICHROMATED GELATIN LAYERS IN HOLOGRAPHY**

The physical and chemical properties of light-sensitive materials based on dichromated gelatin (DCG) are discussed. The chemical and physical-chemical processes that occur in the “gelatin-water” system during the production of the layer and the recording of holograms are described. The various technologies for watering DCG layers, as well as the most common applications of DCG in holography, such as holographic optical elements and image holograms are presented.

Использование желатина с добавками хромовокислых солей в качестве светочувствительной среды для записи голограмм впервые было предложено в 1968 году [1]. Слои бихромированного желатина (БХЖ), наряду с галоидосеребряными фотоэмульсиями традиционно считаются одними из ведущих регистрирующих сред для голографии, благодаря своим высоким оптическим свойствам близким к идеальным [2]. На этих слоях, обладающих высокой разрешающей способностью, превышающей  $3000 \text{ мм}^{-1}$ , можно создавать высокоэффективные голографические структуры толщиной от долей до тысяч микрометров и получать как тонкие, так и объёмные голограммы с высокой селективностью и очень низким уровнем шума. Материал может быть использован для записи как отражательных, так и пропускающих голограмм, а дифракционная

эффективность объёмных голограмм может приближаться к теоретическому пределу – 100 %. Голографическая чувствительность слоя БХЖ на несколько порядков уступает чувствительности галогидосеребряных фотоматериалов. Кроме того, слои без добавления сенситизаторов имеют ограниченный спектральный диапазон светочувствительности (350 - 530 нм). Основным компонентом слоя БХЖ является желатин, который в значительной мере определяет свойства материала [3]. Такие характеристики желатина, как вязкость, прочность геля, размягчение, температура плавления, могут быть изменены с помощью ультрафиолетового излучения, тепла, химических веществ и ультразвука. Для желатина характерна высокая совместимость с широким спектром веществ от простых минеральных солей (галогениды серебра, бихроматы и другие) до сложных органических соединений (например, красители). Желатиновые плёнки хорошо пропускают свет с длинами волн от 350 до 2000 нм. Добавление красителя-сенситизатора позволяет желатину быть чувствительным к широкому диапазону электромагнитного излучения от УФ до среднего ИК. Несенситизированный желатин чувствителен к воздействию коротковолнового УФ, ИК и ионизирующего излучения достаточно большой мощности.

Некоторые задачи голографии требуют обеспечить оптическое качество поверхности слоя, используемого, например, для изготовления голограммных оптических элементов (ГОЭ) на плоских или неплоских подложках. ГОЭ, изготовленные на слоях БХЖ, находят применение в оптическом приборостроении в качестве решёток для спектральных приборов, линз, светофильтров, зеркал, а также в устройствах оптической обработки изображений

В [4] продемонстрирована востребованность светочувствительных материалов на основе БХЖ для голографии и её приложений. Новейшие исследования в области слоёв БХЖ позволяют рассматривать эту светочувствительную среду перспективным материалом для записи оптической информации, изготовления различных голограммных оптических элементов, создания голографических дисплеев и других практических приложений, включая художественную голографию.

#### *Список литературы*

1. Shankoff T.A. // Appl. Opt. 1968. V. 7. P. 2101.
2. Барачевский В.А. // Опт. и спектр. 2018. Т. 124. № 3. С. 371.
3. Calixto S. Ganzherli N., Gulyaev S., Figueroa-Gerstenmaier S. // Molecules. 2018. V. 23 (8). P. 2064.
4. Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н., Маурер И.А. // Опт. и спектр. 2015. Т. 133. № 1. С. 41.

Д.Р. ИВАНЧУК<sup>1</sup>, А.Ю. ИВАНЧУК<sup>1</sup>, С.А. ФОМЧЕНКОВ<sup>1,2</sup>,  
А.И. ЦИБИКИНА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева

<sup>2</sup>Институт систем обработки изображений НИЦ «Курчатовский институт»,  
Самара

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДИФРАКЦИОННЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ОПТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ**

В работе показано моделирование и расчёт ДОЭ для реализации оптической обработки информации. Предложены технологические процессы по изготовлению ДОЭ. Исследованы режимы и технология создания элементов, оптимизированы параметры. Изучены изготовленные элементы.

D.R. IVANCHUK<sup>1</sup>, A.Yu. IVANCHUK<sup>1</sup>, S.A. FOMCHENKOV<sup>1,2</sup>,  
A.I. TSIBIKINA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara National Research University

<sup>2</sup>Image Processing Systems Institute of NRC «Kurchatov Institute», Samara

## **EXPERIMENTAL STUDY OF THE MANUFACTURING PROCESS OF DIFFRACTION FILTERS FOR OPTICAL INFORMATION PROCESSING**

The paper shows the modeling and calculation of DOE for the implementation of optical information processing. Technological processes for the manufacture of DOE are proposed. The modes and technology of creating the element are investigated, the parameters are optimized. The manufactured elements have been studied.

В качестве метода кодирования ДОЭ был выбран метод кодирования с использованием локального скачка фазы.

В ходе экспериментальной работы были изготовлены два ДОЭ, предназначенные для дифференцирования изображения и распознавания объектов, с помощью магнетронного напыления с последующим плазмохимическим травлением (ПХТ) и фотолитографии с прямой лазерной записью.

Технологический процесс состоял из трёх основных этапов: напыление, запись, травление. Напыление хрома производилось на установке вакуумного магнетронного напыления EPOS PVD. С целью

создания маски для травления в плёнке хрома, использовалась станция лазерной записи CLWS 200, которая предназначена для записи микрорельефа с помощью сфокусированного лазерного излучения с длиной волны 532 нм. Рассчитанная маска для записи имела разрешение  $8192 \times 8192$  пикселей. Затем следовал процесс ПХТ. Глубина травления составила 600 нм и отличается от рассчитанной 590 нм менее чем на 2 %.

Для решения задачи распознавания объектов в работе был рассчитан и изготовлен ДОЭ в плёнке фоторезиста. Запись элемента осуществлялась УФ-лазером с длиной волны 405 нм. Толщина элемента контролировалась с помощью профилометра KLA Alpha-step D-500. Высота микрорельефа изготовленного ДОЭ составила 480 нм и отличается от рассчитанной 430 нм на 6 %. Для экспонирования фоторезиста была использована станция круговой лазерной записи CLWS 200. При генерации машинного файла записи размером  $8192 \times 8192$  пикселей использовалось 256 уровней градаций микрорельефа. Данный подход позволяет аппроксимировать непрерывный фазовый микрорельеф многоступенчатыми структурами. Далее, после прямой лазерной записи, на поверхности подложки была сформирована структура ДОЭ.

ДОЭ были экспериментально исследованы. Использовался лазер с длиной волны 532 нм и мощностью 1 Вт. В ходе эксперимента были получены результаты, представленные на рис. 1.

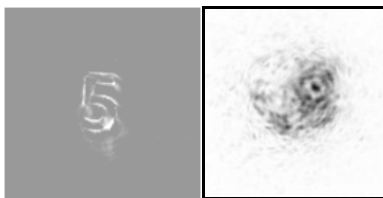


Рис. 1. Результат работы ДОЭ, выполняющий дифференцирование по оси X (слева), результат работы ДОЭ для распознавания образов (справа)

#### *Список литературы*

1. Мисиевич С.К., Скиданов Р.В. // Разработка итеративного алгоритма расчета фазовой функции для пространственного модулятора света.
2. Волков А.В., Головашкин Д.Л., Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Котляр В.В., Павельев В.С., Скиданов Р.В., Соيفер В.А., Соловьев В.С., Успенцев Г.В., Харитонов С.И., Хонина С.Н. // Методы Компьютерной оптики // М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.

Н.М. ГАНЖЕРЛИ, С.Н. ГУЛЯЕВ<sup>1</sup>, И.А. МАУРЕР

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург*

*<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

## **ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ РЕШЁТКИ, ЗАПИСАННЫЕ ВО ВСТРЕЧНЫХ ПУЧКАХ НА ПФГ-01 И ПФГ-03М**

Представлено экспериментальное доказательство возможности реализовать рельефно-фазовую запись голографической информации с помощью оптической схемы регистрации во встречных пучках. Экспериментально показано, что ключевыми операциями фотохимической обработки галоидосеребряных фотоэмульсий являются коротковолновое УФ-облучение фотопластинок ртутной лампой ( $\lambda < 250$  нм) и их последующее кратковременное (10 с) травление в ледяной уксусной кислоте.

N.M. GANZHERLI, S.N. GULYAEV<sup>1</sup>, I.A. MAURER

*Ioffe Institute of the RAS, Saint Petersburg*

*<sup>1</sup>Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University*

## **HOLOGRAPHIC GRATINGS REGISTERED IN COUNTER- PROPAGATING BEAMS ON THE PFG-01 AND PFG-03M**

Experimental evidence is presented of the possibility to realize relief-phase recording of holographic information by means of an optical registration scheme in counter-beams. It is experimentally shown that the key operations of photochemical processing of silver-halide photo-emulsions are short-wave UV irradiation of the photographic plates by a mercury lamp ( $\lambda < 250$  nm) and their subsequent short-time (10 s) etching in glacial acetic acid.

Ранее рельефно-фазовая запись голографической информации с помощью оптической схемы регистрации во встречных пучках была осуществлена только на позитивных фоторезистах, имеющих чувствительность на три порядка ниже, чем у галоидосеребряной фотоэмульсии. Полученные решётки работали на отражение [1]. Характерной особенностью голографической структуры, записанной по контрнаправленной оптической схеме, является выход на поверхность штрихов (плоскостей) внутренней решётки под косым углом [2]. Период внутренней голографической структуры слабо зависит от углов падения опорного и объектного пучков на записывающую среду. Он примерно равен половине длины волны света  $\lambda$  в светочувствительной среде и существенно отличается по величине от периода внутренней структуры.

Предварительные результаты исследований представлены в работах [2, 3], где также описана процедура обработки слоёв, включающая облучение коротковолновым УФ-излучением [4] и быстрое травление.

Проанализированы механизмы формирования поверхностного рельефа в разных диапазонах регистрируемых пространственных частот  $\nu$  и показаны существенные позитивные отличия свойств рельефно-фазовых структур на галогидосеребряных фотоэмульсиях от аналогов, записанных на фоторезисте. На низких пространственных частотах в образовании поверхностного рельефа принимает участие значительная часть толщины фотоэмульсионного слоя. Совокупное действие сил натяжения внутри слоя и сил поверхностного натяжения делает профиль поверхностного рельефа симметричным и позволяет получать большие значения высоты поверхностного рельефа  $h$  (около 1 мкм), которые сопоставимы со значениями  $h_{\max}$  для рельефно-фазовых голограмм на материале ПФГ-01, регистрируемых в сходящихся пучках [5].

Асимметричный характер рельефа для ПФГ-01 был получен только на некоторых образцах со сверхнизкой пространственной частотой ( $\nu < 40 \text{ мм}^{-1}$ ), что является скорее исключением, чем правилом. На пространственных частотах  $\nu > 500 \text{ мм}^{-1}$  высота поверхностного рельефа  $h$ , вычисленная согласно теории тонких рельефных голограмм в приближении Рамана–Ната через дифракционную эффективность DE, стремится к величине 0,22 мкм. Достигнутые глубины поверхностного рельефа достаточны для создания высокоэффективных рельефно-фазовых голографических структур, работающих на пропускание в области низких пространственных частот. На более высоких пространственных частотах голографические структуры, записанные по контрнаправленной оптической схеме, могут быть эффективно использованы на отражение после металлизации поверхности.

Включение в процедуру обработки фотопластинок ПФГ-01 и ПФГ-03М операции облучения фотоэмульсии коротковолновым УФ-излучением значительно расширяет область регистрируемых пространственных частот, в которой можно получать значимые величины DE пропускающих голографических решёток.

#### *Список литературы*

1. Sheridan N.K. // Appl. Phys. Lett. 1968. V. 12. No. 9. P. 316.
2. Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н., и др. // Опт. и спектр. 2024. Т. 132. № 9. С. 908.
3. Gulyaev S.N., Ganzherli N.M., et al. // Proc. 2024 (EEExPolytech). P. 454.
4. Гуляев С.Н., Ратушный В.П. // Оптический журнал. 2003. Т. 70. № 2. С. 45.
5. Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н., Маурер И.А. // Опт. и спектр. 2022. Т. 130. № 9. С. 1385.

Е.К. БАЛАНДИН, А.В. КОЗЛОВ, П.А. ЧЕРЁМХИН,  
Н.Н. ЕВТИХИЕВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **БЕЗРЕФЕРЕНСНАЯ МЕТРИКА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ, ВОССТАНОВЛЕННЫХ ИЗ ГОЛОГРАММ**

Приведены результаты разработки безреференсной метрики оценки качества изображений, восстановленных из голограмм, основанной на сравнении исследуемого изображения с набором усреднённых изображений.

E.K. BALANDIN, A.V. KOZLOV, P.A. CHEREMKHIN,  
N.N. EVTIKHIEV

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

## **NO-REFERENCE METRIC FOR EVALUATING OF IMAGES RECONSTRUCTED FROM HOLOGRAMS**

The results of the development of a reference-free metric for evaluating the quality of images recovered from holograms based on a comparison of the image under study with a set of averaged images.

В задачах фильтрации и сжатия изображений, восстановленных из голограмм, требуются метрики для оценки их качества [1]. В рамках голографической регистрации идеальное (референсное) изображение обычно отсутствует, в связи с чем востребованными являются безреференсные метрики, то есть метрики, не требующие сравнения с идеальным изображением для своей работы. Цель данной работы состояла в разработке подобной метрики.

Основная идея метода заключается в оценке качества отфильтрованного изображения путём его сравнения с результатом усреднения изображений со случайными реализациями шума. Выбор обусловлен известной статистикой величины спекл-шумов [2]  $\sim 1/\sqrt{N}$ , где  $N$  – число усреднённых изображений. Для сравнения результата фильтрации и усреднённых изображений применяется объективная метрика индекса структурного сходства (ИСС) [3], выбранная в связи с тем, что фильтры вносят свои искажения (например, размывают границы), а ИСС дает оценку, приближённую к восприятию человека, в отличие от популярных попиксельных метрик. Результатом оценки метрикой является



число усреднённых изображений  $N_{\text{ЭКВ}}$ , необходимое для достижения качества, эквивалентного обработанному. Оно соответствует точке выхода на плато зависимости ИСС от количества усреднения (рис. 1а). Для нахождения точки выхода ИСС на уровень стагнации полученные значения метрики аппроксимируются экспоненциальной функцией с дополнительными коэффициентами. Далее находится производная и номер усреднения  $N_{\text{ЭКВ}}$ , ближайший к переходу к стагнации зависимости производной от числа усреднённых изображений (рис. 1б).

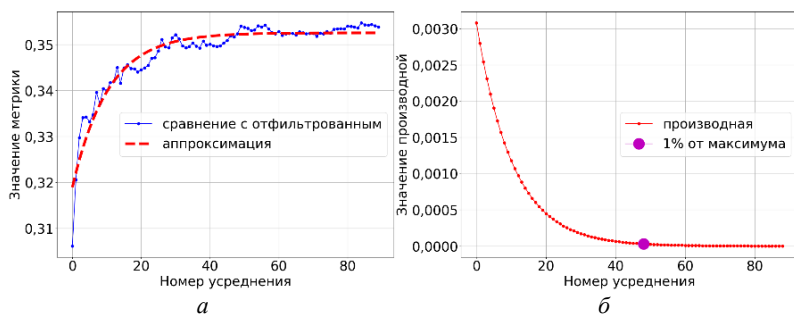


Рис. 1. Пример зависимости ИСС (а) и её производной (б) от количества усреднённых изображений

Полученная метрика обеспечивает как оценку качества изображений, восстановленных из голограмм, так и учёт их особенностей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 24-19-00899.

#### Список литературы

1. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Kozlov A.V., Krasnov V.V., Rodin V.G., Starikov R.S. An optical-digital method of noise suppression in digital Holography // Journal of Optics. 2022. V. 24. No. 11. P. 115702.
2. Goodman J.W. Speckle phenomena in optics: theory and applications // Journal of Statistical Physics. 2008. V. 130. P. 413-414.
3. Wang Z., Bovik A.C., Sheikh H.R., Simoncelli E.P. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity // IEEE Trans. Image Process. 2004. V. 13. P. 600-612.

С.А. КИРИЙ, Д.А. РЫМОВ, А.С. СВИСТУНОВ, Р.С. СТАРИКОВ,  
П.А. ЧЕРЁМХИН

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ГОЛОГРАММ ОБЪЁМНЫХ СЦЕН**

Для восстановления изображений с цифровых и компьютерных голограмм 3D-сцен реализованы различные методы на основе современных свёрточных сетей. Проведено сравнение обученных моделей и оценено качество восстановленных с голограмм изображений.

S.A. KIRIY, D.A. RYMOV, A.S. SVISTUNOV, R.S. STARIKOV,  
P.A. CHEREMKHIN

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

## **INVESTIGATION OF DEEP LEARNING METHODS FOR IMAGE RECONSTRUCTION FROM HOLOGRAMS OF VOLUME SCENES**

Methods based on modern convolutional networks have been implemented to restore images from digital and computer holograms of 3D scenes. The trained models were compared and quality of reconstructed images was estimated.

Применение нейронных сетей позволяет расширять возможности обработки данных в области голографии [1]. Например, такой подход может обеспечить уменьшения шума или понижения уровня помех при восстановлении изображений [2] за счёт обучения модели на исходных изображениях объектов, что позволяет выделить из голограммы только требуемую информацию без использования дополнительной фильтрации.

В работе проведён обзор, реализация и исследование методов восстановления изображений с голограмм с применением свёрточных и генеративно-состязательных нейросетей (ГСН). ГСН использует одновременно две нейронные сети, одна из которых производит восстановление изображений с голограмм (сеть-генератор), а вторая оценивает качество полученных результатов (сеть-дискриминатор) [3]. Таким образом происходит взаимообучение двух нейросетей, что может

способствовать более тщательному обучению сети-генератора и, как следствие, более высокому качеству восстановления изображений.

На рис. 1 представлены примеры оригинальных изображений (*а, в*) и восстановленных при помощи обученной модели с голограмм (*б, г*). Разработанная модель основана на ГСН, состоящей из сети-генератора с архитектурой U-Net [4] и сети-дискриминатора. В работе рассмотрены современные модели нейронных сетей и на основе свёрточных конструкций и проведено сравнение данных методов с предложенным.

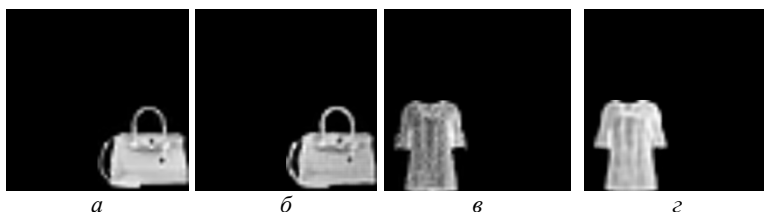


Рис. 1. Примеры оригиналов объектов (*а, в*) и восстановленных изображений с применением генеративно-сопоставительной нейросети (*б, г*)

Разработанная генеративно-сопоставительная нейронная сеть показывает высокий результат по качеству реконструкции изображений и с цифровых, и компьютерных голограмм объёмных сцен как осевого, так и внеосевого типов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 22-79-10340-П.

#### *Список литературы*

1. Cheremkhin P.A., Rymov D.A., Svistunov A.S., et al. Neural-network-based methods in digital and computer-generated holography: a review // J. Opt. Technol. 2024. V. 91. P. 170-180.
2. Situ G. Deep holography // Light: Advanced Manufacturing. 2022. V. 3. P. 278-300.
3. Kiriya S.A., Rymov D.A., Svistunov A.S., Starikov R.S., Shifrina A.V., Cheremkhin P.A. Generative adversarial neural network for 3D-hologram reconstruction // Laser Physics Letters. 2024. V. 21. P. 045201.
4. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation // MICCAI. 2015. V. 9351. P. 234-241.

А.С. СВИСТУНОВ, Д.А. РЫМОВ, Р.С. СТАРИКОВ,  
П.А. ЧЕРЁМХИН, Н.Н. ЕВТИХИЕВ  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ СИНТЕЗИРУЕМОГО НАБОРА ДАННЫХ ДЛЯ ЗАДАЧ НЕЙРОСЕТЕВОЙ ОБРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ БИОЛОГИЧЕСКИХ КЛЕТОК**

Разработан специализированный набор данных, состоящий из процедурно сформированных изображений биологических клеток, параметры которых определялись на основе экспериментальных изображений. Продемонстрирована эффективность нейросетевого подхода при решении задачи реконструкции изображений из цифровых голограмм с использованием данного набора данных.

A.S. SVISTUNOV, D.A RYMOV, R.S. STARIKOV,  
P.A. CHEREMKHIN, N.N. EVTIKHIEV  
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*

## **ASSESSMENT OF THE APPLICABILITY OF SYNTETIC DATASET FOR NEURAL NETWORK PROCESSING OF BIOLOGICAL CELLS DIGITAL HOLOGRAMS**

A specialized dataset composed of procedurally generated images of biological cells was developed, with parameters derived from real experimental images. The effectiveness of the neural network-based approach for solving the problem of image reconstruction from digital holograms using the proposed dataset was demonstrated.

В настоящее время цифровая голография широко используется в биологии, медицине, экологическом мониторинге, при этом всё активнее применяются нейронные сети для решения задач реконструкции [1], классификации [2] и анализа голографических данных [3]. Однако обучение таких моделей, как правило, опирается на универсальные наборы данных [4], слабо связанные с практическими задачами, что обуславливает актуальность разработки специализированных, численно синтезируемых датасетов, ориентированных на прикладные применения.

В качестве объектов моделирования при создании датасета использовались клетки двух классов: здоровые клетки кожи человека и клетки меланомы. В их основе лежат изображения из [2]. Полученный набор данных реализует процедурную генерацию изображений клеток

двух классов с возможностью настройки, формирование сцены с клетками и запись голографического видео их движения.

Датасет был апробирован в ряде задач, в том числе задаче нейросетевого восстановления фазового распределения поля по цифровой голограмме. Для этого реализована модификация глубокой версии архитектуры сети U-Net с остаточными блоками. Примеры реконструированных изображений приведены на рис. 1. Значения индекса структурного сходства в сравнении с эталонным изображением (*а*) составили 0,965 при факторе разбиения 4 (*б*) и 0,968 при факторе разбиения 2 (*в*).

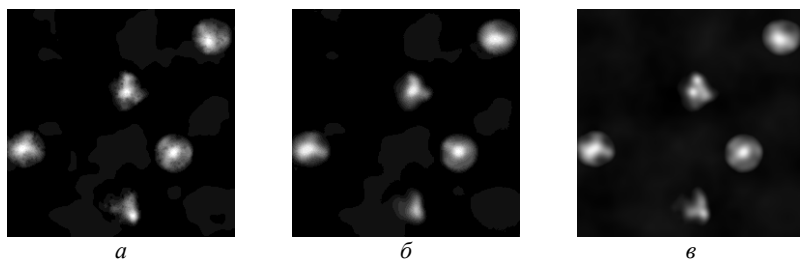


Рис. 1. Оригинальное изображение (*а*) и изображения, восстановленные с цифровых голограмм с фактором разбиения 4 (*б*) и 2 (*в*)

Таким образом, созданный набор данных может быть применён при решении различных задач в области цифровой голографии, в том числе для обучения нейронных сетей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 24-19-00899.

#### *Список литературы*

1. Svistunov A.S., Rymov D.A., Starikov R.S., Cheremkhin P.A. HoloForkNet: Digital hologram reconstruction via multibranch neural network // *Applied Sciences*. 2023. V. 13. No. 10. P. 6125.
2. Dudaie M., et al. On-chip label-free cell classification based directly on off-axis holograms and spatial-frequency-invariant deep learning // *Scientific Reports*. 2023. V. 13. P. 12370.
3. Cheremkhin P.A., Rymov D.A., Svistunov A.S., et al. Neural-network-based methods in digital and computer-generated holography: a review // *J. Opt. Technol.* 2024. V. 91. P. 170-180.
4. Sun X., Xiong C., Ren Z., Di J., Zhao J. Unpaired learning for digital holographic reconstruction and generation // *Optics Express*. 2025. V. 33. P. 3414–3428.

З.С. МАРКОВ, Е.Ю. ЗЛОКАЗОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **НЕЙРОСЕТЕВОЙ ПОДХОД К КОРРЕКЦИИ ВОЛНОВОГО ФРОНТА В КОМПЬЮТЕРНОЙ ГОЛОГРАФИИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДИФРАКЦИОННЫХ КАРТИН**

В работе представлен метод коррекции aberrаций волнового фронта в компьютерной голографии, основанный на глубоком обучении. Метод использует анализ дифракционных картин для предсказания искажений, описываемых коэффициентами полиномов Цернике. Обучение сверточной нейронной сети проводилось на наборе данных, полученных численными методами. Результаты демонстрируют высокую точность восстановления коэффициентов, что подтверждает перспективность подхода для разработки систем автоматической адаптивной оптики.

Z.S. MARKOV, E.Yu. ZLOKAZOV

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

## **NEURAL NETWORK APPROACH TO WAVEFRONT CORRECTION IN COMPUTER HOLOGRAPHY BASED ON THE ANALYSIS OF DIFFRACTION PATTERNS**

This work presents a deep learning-based method for correcting wavefront aberrations in computer-generated holography. By analyzing diffraction patterns, the method predicts distortions characterized by Zernike polynomial coefficients. A convolutional neural network, trained on a numerically generated dataset, achieves high coefficient recovery accuracy, demonstrating the approach's potential for developing automatic adaptive optical systems.

В контексте развития прецизионных технологий фотоники и оптических методов обработки информации особую важность приобретает задача оперативного контроля и коррекции волнового фронта в когерентных оптических системах, в частности, в системах формирования двумерных изображений. Полиномы Цернике являются стандартным математическим аппаратом для описания оптических aberrаций, однако традиционные методы измерения коэффициентов при полиномах, такие как использование датчика Шака–Гартмана [1, 2] или инструментов интерферометрического анализа [3, 4], отличаются сложностью оптической схемы и высокой стоимостью.

Альтернативный подход, представленный в работах [5, 6], основан на извлечении информации о фазовом сдвиге из изменения распределения интенсивности света в результате дифракции на разных дифракционных оптических элементах (рис. 1). Для восстановления фазового портрета используется алгоритм Герчберга–Сэкстона с ограничением амплитуды в плоскости регистрации и фазового набеге в плоскости модуляции. Несмотря на высокую точность восстановления фазы и высокое разрешение, ограниченное размерами пикселя камеры и модулятора, итерационный метод оценки фазы обладает существенными недостатками: низкой скоростью вычисления корректирующей фазовой маски и численными артефактами быстрого преобразования Фурье.

Для преодоления ограничений итерационного алгоритма предлагается использование свёрточных нейронных сетей для установления нелинейного соответствия между дифракционными изображениями и коэффициентами полиномов Цернике. Для задачи восстановления коэффициентов при полиномах Цернике разработана архитектура свёрточной нейронной сети, использующая пять блоков извлечения признаков, механизм пространственного внимания и две ветви для регрессии геометрических параметров и коэффициентов при полиномах Цернике. Синтезирован набор данных для обучения (рис. 2), на основе которого проведено обучение модели для предсказания формы волнового фронта и последующего расчёта корректирующей фазовой маски.

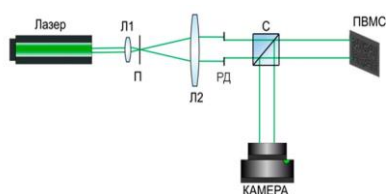


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

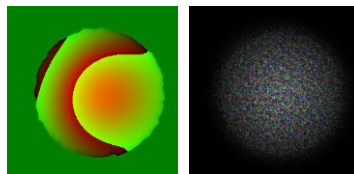


Рис. 2. Пример профиля пучка и картины дифракции в наборе данных

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 22-79-10340-П.

#### Список литературы

1. Hu ., Hu S., Gong W., Si K. // Optics Express. 2019. V. 27. P. 33504-33517.
2. Galaktionov I., Sheldakova J., et al. // Algorithms. 2023. V. 16 (7). P. 337
3. Dussan L., Ghebremichael F., Chen K. // Opt. Eng. 2009. V. 48. P. 085801
4. Lin Z., Jia S., Xu Y., et al. // Optics and Lasers in Engineering. 2025. V. 185. P. 108718.
5. Zhang F., Pedrini G., Osten W. // Phys. Rev. A. 2007. V. 75. P. 043805.
6. Wu Y., Sharma M., Veeraraghavan A. // Light: Science & Applications. 2019. V. 8. P. 44.

Е.В. ПРОКУДИН, А.В. ШИФРИНА

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **СИСТЕМА НЕЙРОСЕТЕВОЙ АУТЕНТИФИКАЦИИ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНО-СИНТЕЗИРОВАННЫХ КИНОФОРМОВ**

Предложена система аутентификации, использующая компьютерно-синтезированные киноформы и нейронную сеть (НС). Численное моделирование демонстрирует коэффициент корреляции (КК)  $(0,79 \pm 0,11)$  для киноформов, синтезированных с применением предложенной системы, и  $(0,15 \pm 0,06)$  для киноформов, полученных другим способом. Оценка криптографической стойкости системы подтверждает, что она может быть применена в задачах криптографии.

E.V. PROKUDIN, A.V. SHIFRINA

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

## **NEURAL NETWORK AUTHENTICATION SYSTEM BASED ON COMPUTER-GENERATED KINOFORMS**

We are proposing authentication system which uses computer-synthesized kinoforms and a neural network. Numerical modeling demonstrates the correlation coefficient (CC)  $(0.79 \pm 0.11)$  for kinoforms synthesized using the proposed system, and  $(0.15 \pm 0.06)$  for the ones obtained with other methods. The assessment of the cryptographic strength of the system confirms that it can be applied in cryptography tasks.

Аутентификация – процесс в системах защиты информации, заключающийся в установлении подлинности пользователя. Создание высокоточных и быстродействующих систем аутентификации актуально из-за растущей распространённости угроз кибербезопасности, нарушений данных и мошенничества.

Предложена система нейросетевой аутентификации с использованием компьютерно-синтезированных киноформов, полученных алгоритмом Герчберга–Сэкстона. На вход алгоритма поданы отмасштабированные до  $128 \times 128$  пикселей изображения, полученные из датасета CIFAR-10. Схема данной системы представлена на рис. 1. Ниже приведён принцип работы системы для синтеза ключей аутентификации и последующей валидации.



После получения матриц киноформов, которые преобразуются в вектор вместе с начальным фазовым распределением (НФР), итоговые векторы приводятся к нулевому среднему и единичной дисперсии, вычисляется проекция таких векторизованных киноформов на НФР, и из киноформов вычитаются полученные проекции. Далее предобработанные киноформы из векторного представления обратно преобразуются в изображения и предоставляются в качестве ключей аутентификации.

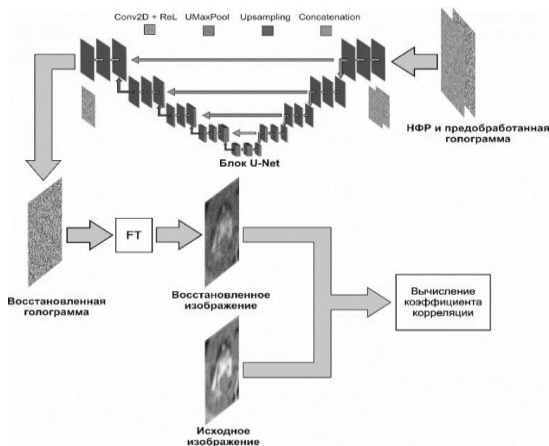


Рис. 1. Схема предложенной системы аутентификации

Аутентификация происходит следующим образом: в нейронную сеть передается ключ аутентификации и НФР, на её выходе синтезируются киноформ, из которого восстанавливается изображение, используя преобразование Фурье. Далее вычисляется коэффициент корреляции (КК) восстановленного изображения с соответствующим исходным изображением. Если вычисленное значение КК больше порогового, то аутентификация происходит успешно, в противном случае пользователь признается нелегитимным.

Реализована предложенная система нейросетевой аутентификации с использованием киноформов, а также для данного метода произведена оценка криптографической стойкости, показавшая значения КК ( $0,79 \pm 0,11$ ) для киноформов, полученных с применением предложенной системы, и ( $0,15 \pm 0,06$ ) для киноформов, полученных другим способом. Представленный метод позволяет использовать ключи аутентификации в десятки-сотни килобит, что является существенным достоинством для задач криптографии.

А.С. ОВЧИННИКОВ, В.В. КРАСНОВ, П.А. ЧЕРЁМХИН,  
А.В. ШИФРИНА

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **АДАПТИВНЫЙ МЕТОД СИНТЕЗА БИНАРНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Разработаны три вариации адаптивного метода бинаризации голограмм, основанные на выборочном применении алгоритма прямого поиска со случайной траекторией. Метод позволяет значительно ускорить процесс итерационной обработки при сохранении высокого качества реконструкции изображений.

A.S. OVCHINNIKOV, V.V. KRASNOV, P.A. CHEREMKHIN,  
A.V. SHIFRINA

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

## **ADAPTIVE METHOD OF SYNTHESIS FOR BINARY DIFFRACTION OPTICAL ELEMENTS**

Three variations of the adaptive hologram binarization method have been developed. They are based on the selective application of direct search with a random trajectory algorithm. The method makes it possible to significantly speed up the iterative processing operation while maintaining high-quality image reconstruction.

В связи с растущим применением высокоскоростных бинарных микрозеркальных модуляторов (МЗМ) света для оптико-цифровых систем, актуальной задачей является эффективная бинаризация изображений, в том числе голограммных и дифракционных оптических элементов [1]. Бинаризация остаётся наиболее простым способом адаптации голограмм для их отображения на МЗМ [2], однако классические методы вносят существенные искажения в голограммы и значительно снижают качество восстановления изображений.

Целью работы являлась разработка гибридного алгоритма бинаризации амплитудных голограмм, способного значительно уменьшить время обработки алгоритмом прямого поиска со случайной траекторией (ППСТ) [3] при минимальном влиянии на качество восстановления распределений из данных голограмм. Для этого были предложены три вариации адаптивного метода, использующие идею выборочного применения ППСТ только к наиболее «сложным» пикселям голограммы, где стандартные методы бинаризации дают наибольшую ошибку. Первая вариация

алгоритма заключается в следующем: синтезируется полутонная голограмма; формируются её бинарная и квантованная версии; в соответствии с квантованным изображением подбираются два порога (рис. 1а):  $T_w$  – выше которого всем пикселям присваивается значение 255 (область 1), и  $T_b$  – ниже которого всем пикселям присваивается значение 0 (область 3); область между ними (область 2), содержащая «сложные» пиксели, принимает значения согласно бинарной версии голограммы, а затем обрабатывается методом ППСТ.

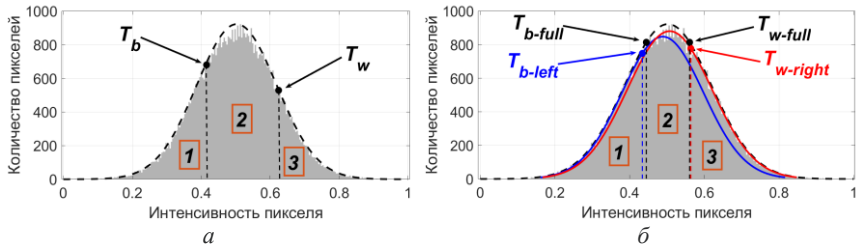


Рис. 1. Расположение порогов для первой вариации алгоритма (а), а также для второй и третьей вариации алгоритма при значении  $\sigma = 0.5$  (б)

Вторая и третья вариации алгоритма заключаются в аппроксимации гистограммы распределения интенсивности полутонной голограммы одним и двумя распределениями Гаусса соответственно. Выбор пороговых значений  $T_{w-full}$  и  $T_{b-full}$ , а также  $T_{w-left}$  и  $T_{b-right}$  (рис. 1б) осуществляется в соответствии со значением параметра  $\sigma$  – среднеквадратического отклонения, полученных распределений Гаусса. Дальнейшая обработка всех трёх областей осуществляется аналогично первому подходу.

Для оценки эффективности методов проведены численные эксперименты. Синтезированные голограммы имели размеры от  $256 \times 256$  до  $1080 \times 1080$  пикселей. Достигнуто десятикратное ускорение обработки при потере в качестве лишь на 2 %. В случае двукратного ускорения обработки потери в качестве составили в среднем всего 0,4 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 22-79-10340-П.

#### Список литературы

1. Jiao S. // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2020, V. 26. P. 1-8.
2. Ovchinnikov A.S.; Krasnov V.V., et al. // Journal of Imaging. 2023. V. 9. No. 2. P. 28.
3. Cheremkhin P.A.; Evtikhiev N.N., et al. // Optics and Lasers in Engineering. 2022. V. 150. P. 106859.

Ю.С. ЛЕНКОВА, Е.К. ПЕТРОВА, А.В. ШИФРИНА  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **МЕТОДЫ ИНТЕРПОЛЯЦИИ И БИНАРНОГО РАСТРИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЗАДАЧАХ КОРРЕЛЯЦИОННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ**

Реализованы методы бинарного растривания и интерполяции для повышения эффективности корреляционного оптического распознавания объектов. Показано, что корреляционное распознавание растриванного изображения позволяет достичь более чёткого разделения между истинными и ложными изображениями.

Yu.S. LENKOVA, E.K. PETROVA, A.V. SHIFRINA  
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*

## **INTERPOLATION AND BINARY DITHERING METHODS FOR IMAGE PROCESSING IN CORRELATION-BASED PATTERN RECOGNITION**

Methods of binary dithering and interpolation have been implemented to enhance the efficiency of optical correlation-based object recognition. It is shown that correlation recognition of dithered images enables clearer separation between true and false objects.

Корреляционные методы распознавания образов остаются актуальными благодаря высокому быстродействию, многопоточной обработке и устойчивости к шуму, что даёт им преимущество перед цифровыми нейросетевыми подходами при ограниченных вычислительных ресурсах. Однако практическая реализация таких систем с использованием микрзеркальных пространственно-временных модуляторов света, как наиболее быстродействующих, сталкивается с ограничениями ввиду их сугубо бинарной модуляции.

В работе продемонстрировано использование методов интерполяции и бинарного растривания в задачах синтеза корреляционных фильтров. Применены бикубическая интерполяция и адаптивные схемы приведения к бинарному растру с различным количеством эффективных градаций яркости. Рассмотрены два метода растривания: приведение к кратному разрешению (эквивалентно квантованию на количество эффективных градаций яркости) и преобразование к некрatному разрешению, при котором исходное изображение приводится к кратному разрешению, а

дополнительные строки и столбцы равномерно вставляются между полученными блоками. Предложены два способа заполнения дополнительных элементов: либо путём интерполяции между соседними пикселями, либо на основе усреднения значений в окрестности блока исходных пикселей, соответствующих данному положению, что позволяет добиться более равномерной интерполяции (рис. 1).



Рис. 1. Фрагмент исходного (*а*) изображения и его же, после приведения к бинарному растру с увеличением в 2 (*б*), 2,25 (*в*) и 2,5 (*г*) раза

Осуществлён синтез фильтров для полутоновых и растриванных изображений при изменении угла поворота.

Применение бинарного растривания позволяет достичь значительно более высоких значений отношения сигнал/шум (ОСШ), обеспечивая чёткое различие в значениях между истинными и ложными изображениями (рис. 2).

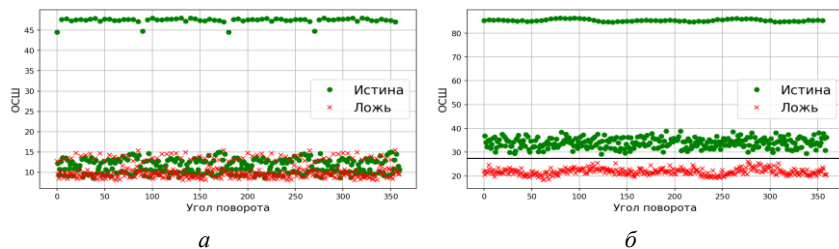


Рис. 2. Эффективность распознавания в зависимости от угла поворота изображения: полутоновые изображения (*а*), растриванные изображения (*б*)

Предложенные методы предобработки обеспечивают возможность применения корреляционных фильтров в системах на основе микрозеркальных модуляторов.

Ф.А. УШАКОВ, Д.В. ПАВЛЕНКО,  
Е.Ю. ЗЛОКАЗОВ, Р.С. СТАРИКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **РЕАЛИЗАЦИЯ СВЁРТКИ БИНАРИЗОВАННЫХ КОНТУРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ОПТИКО-ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ**

В работе представлена экспериментальная реализация схемы когерентного 4F-коррелятора с использованием двух пространственно-временных модуляторов света: входного ( $1920 \times 1080$ ) и фильтрующего ( $2560 \times 1600$ ). Исследована методика оптического согласования масштабов пространственных спектров путём подбора фокусных расстояний линз таким образом, чтобы дифракционное поле от элементарного пикселя входной плоскости перекрывало рабочую область маски. Точность технической реализации подтверждена получением корреляционного сигнала в виде дельта-функции для бинаризованных контурных изображений, зарегистрированного камерой с высоким разрешением.

F.A. USHAKOV, D.V. PAVLENKO,  
E.Yu. ZLOKAZOV, R.S. STARIKOV

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

## **IMPLEMENTATION OF BINARIZED CONVOLUTION CONTOUR IMAGES IN AN OPTO-DIGITAL SPATIAL FILTERING SYSTEM**

This paper presents the experimental implementation of a coherent 4F-correlator scheme using two spatial light modulators: input ( $1920 \times 1080$ ) and filtering ( $2560 \times 1600$ ). The method of optical scale matching is investigated by selecting lens focal lengths such that the diffraction field from an elementary pixel of the input plane covers the working area of the mask. The precision of the technical implementation is confirmed by obtaining a correlation signal in the form of a delta function for binarized contour images, recorded by a high-resolution camera.

В современных системах оптической обработки информации схема 4F-коррелятора остается одной из ключевых архитектур для выполнения операций свёртки и распознавания образов в реальном времени. Переход к цифровой оптике, где ввод информации осуществляется с помощью высокоскоростных микрозеркальных пространственно-временных модуляторов света (ПВМС), требует решения задачи согласования

пространственных спектров входных изображений и фильтров. Особенно остро эта проблема стоит при использовании изображений с высоким разрешением и малым размером пикселей.

Целью данной работы являлась разработка экспериментальной установки 4F-коррелятора, предназначенного для обработки бинарных контурных изображений. Выбор контурных объектов обусловлен их насыщенным спектром высокими пространственными частотами, что делает систему чувствительной к малейшим рассогласованиям масштабов. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

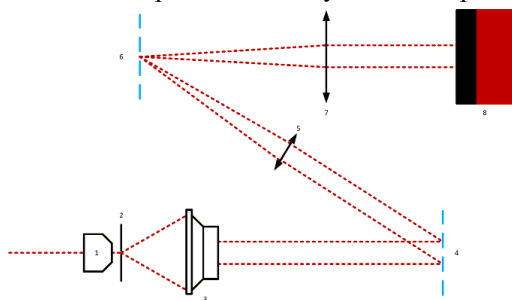


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (4F-коррелятора): 1 – DPSS-лазер, 2 – точечное отверстие, 3 – объектив для коллимации пучка, 4 – модулятор входного слоя, 5, 7 – линзы, 6 – фильтр, 8 – цифровая фотокамера

Ключевой задачей работы являлся подбор оптимального масштабирующего коэффициента оптической системы. Теоретически, фундаментальное условие связи периодов дискретизации требует, чтобы дифракционная картина (спектр), формируемая входным изображением, точно соответствовала физическим координатам пикселей фильтра. В эксперименте использовался набор тонких линз с различными фокусными расстояниями. Для проверки точности технической реализации использовались тестовые пары «изображение – согласованный фильтр». При корректной юстировке и масштабном согласовании свёртка таких пар должна давать автокорреляционную функцию, приближающуюся к идеальной дельта-функции (яркой точке). На разработанной установке были успешно получены чёткие, высококонтрастные корреляционные пики для различных контурных объектов. Использование камеры с высоким разрешением позволило зафиксировать высокое отношение сигнал/шум и подтвердить, что энергия корреляционного отклика сосредоточена в пределах дифракционного предела, что свидетельствует о высокой точности сборки и настройки системы 4F-коррелятора.

А.Н. ЗВЯГИН, П.А. ЧЕРЁМХИН, А.В. КОЗЛОВ, В.Г. РОДИН,  
Н.Н. ЕВТИХИЕВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ФУРЬЕ-ПТИХОГРАФИИ ПОШАГОВОЙ ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТРАЦИЕЙ**

Для повышения качества восстановления изображений в фурье-птихографии и ускорения регистрации предложен метод, использующий пошаговую фильтрацию на каждой итерации алгоритма реконструкции. Метод обеспечил двукратное улучшение значений метрик оценки качества в сравнении со стандартной реализацией алгоритма.

A.N. ZVYAGIN, P.A. CHEREMKHIN, A.V. KOZLOV, V.G. RODIN,  
N.N. EVTIKHIEV

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

## **IMPROVING THE RECONSTRUCTION QUALITY IN FOURIER PTYCHOGRAPHY USING STEPWISE DIGITAL FILTERING**

To improve the reconstruction quality in Fourier ptychography and speed up registration, a method using stepwise filtering at each reconstruction algorithm iteration was proposed. The method gave twofold improvement in quality assessment metrics compared to the standard implementation.

Фурье-птихография – метод повышения разрешения амплитудно-фазовых параметров объектов по серии дифракционных картин, регистрируемых под различным углом освещения [1]. К числу основных ограничений метода относится относительно низкая скорость регистрации из-за необходимости получения большого набора изображений. В работе предлагается метод повышения качества реконструкции изображений за счёт пошаговой цифровой фильтрации при восстановлении изображения.

Проведено численное моделирование процесса регистрации птихограмм с использованием амплитудно-фазовых объектов размерностью  $1024 \times 1024$  пикс. Исследование выполнено для 8- и 16-битных камер с учётом их шумовых характеристик (неоднородности темнового сигнала, неоднородности фоточувствительности, темнового временного шума, константы пересчёта в цифровые единицы сигнала) [2]. Проанализирована эффективность применения следующих цифровых



фильтров: NLM, BM3D и фильтра Фроста. Качество восстановления оценивалось количественными метриками по результатам каждого шага реконструкции. Для восстановления использовались модифицированный алгоритм Герчберга–Сэкстона и метод с применением потока Виртингера.

Получено, что максимальное улучшение качества восстановления достигается при низких экспозициях, когда значительны шумы цифровой камеры. В этом случае алгоритм Герчберга–Сэкстона обеспечил улучшение качества более чем в 2 раза, а поток Виртингера – в 1,5 раза по сравнению с базовым алгоритмом в фурье-птихографии. На рис. 1а представлены примеры графиков зависимости качества восстановления амплитуды по метрике нормированного среднеквадратического отклонения (НСКО) от числа итераций алгоритма Герчберга–Сэкстона. Восстановленные изображения для стандартного алгоритма и алгоритма с применением фильтра BM3D показаны на рис. 1б, в соответственно; для каждого метода было проведено по 25 итераций.

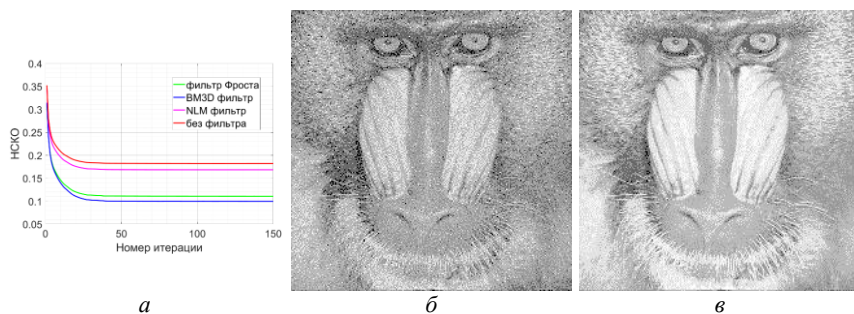


Рис. 1. Графики зависимости качества восстановления амплитуды объекта от числа итераций алгоритма (а) и восстановленные изображения после 25 итераций алгоритма реконструкции в стандартной реализации (б) и с фильтром BM3D (в)

Таким образом, предложенный метод обеспечивает существенное повышение качества восстановления изображений, в том числе при малых экспозициях, что может быть использовано для ускорения реконструкции данных в фурье-птихографии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 24-19-00899.

#### Список литературы

1. Konda P.C., et al. // Optics express. 2020. V 28. No. 7. P. 9603-9630.
2. Козлов А.В. и др. // Измерительная техника. 2024. № 12. С. 26-34.

## ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

### -А-

Абдуллаев А.С. 37  
Абеуов Д.Р. 306  
Абрамов А.С. 99  
Авакянц Л.П. 93  
Авдеев В.В. 171  
Аверин С.В. 229, 302  
Авласевич Н.Т. 626  
Автандилов К.Ш. 430  
Азанова И.С. 504  
Азаров И.А. 37  
Аймагамбетова А.А. 296  
Аймуханов А.К. 292, 306  
Айт А.О. 324  
Акрестина А.С. 480, 484  
Алагашев Г.К. 133  
Алешин А.Н. 87  
Алтухов Ю.А. 472  
Алыкова О.М. 548  
Амброзевич С.А. 69, 330  
Аммосов А.П. 374  
Андреади А.В. 340  
Анисимов Р.И. 480  
Анпилов В.С. 434  
Антонов И.О. 237  
Антонычева Е.А. 85  
Апасьева А.Е. 484  
Арбузова К.М. 628  
Арсенин А.В. 33, 85, 97  
Артемов Д.Е. 462  
Архипов М.Ю. 115  
Арцер И.Р. 31  
Асадчиков В.Е. 181, 386  
Асташкевич С.А. 364, 366, 388, 390  
Афанасьев М.С. 131  
Ахмеджанов И.М. 257  
Ашарчук Н.М. 65  
Ашихмин Д.И. 65, 414, 418  
Ашуркова А.А. 165

### -Б-

Бабурин А.С. 57  
Багочюс Е.К. 37  
Багров А.Р. 362  
Бадеев В.А. 522  
Бажутова И.В. 416, 420  
Бакиев Д.К. 292  
Бакунов М.И. 53  
Балан Н.Н. 562  
Баландин Е.К. 636  
Баленко Н.В. 43  
Баранник А.В. 37  
Баранов Д.В. 257  
Баранов М.А. 280  
Баринова О.П. 314  
Барышев А.В. 57  
Батраков М.Е. 524  
Батуев И.О. 101, 135  
Бахус А.В. 436  
Бейсембеков М.К. 300  
Бейтук Ю.Р. 626  
Бекжан Н.А. 288  
Белов Д.А. 187, 542  
Белов К.Н. 147  
Белотелов Г.С. 255  
Белоусова П.О. 318  
Белый В.Н. 606  
Беляева В.С. 185, 189  
Белянова Е.Ю. 380  
Бенгальский Д.М. 239  
Бердыбаева Ш.Т. 400  
Березкин В.В. 181  
Бестугин А.Р. 606  
Биленко И.А. 195, 368  
Блоцкая Д.С. 494  
Бобков А.А. 91  
Бобылева Е.А. 498  
Бобылева О.Г. 205, 588  
Богачков И.В. 512, 518  
Богданов А.А. 28  
Бодунов Д.А. 99  
Болтенко А.В. 332  
Большаков А.П. 284

Борейшо А.С. 235, 249  
 Боритко С.В. 231  
 Борминцев А.А. 191  
 Боровиков В.Н. 336  
 Бородин Ю.П. 259  
 Бородинкин И.И. 193  
 Бражников М.К. 506, 510, 530  
 Брецько М.В. 596, 600, 604  
 Брюшинин М.А. 476  
 Бугасов И.А. 554  
 Будуева Ч.Б. 484  
 Булгаков В.А. 233  
 Булыга Д.В. 179  
 Булычев И.А. 179  
 Булюк А.Н. 229  
 Бурданова М.Г. 97, 304, 620  
 Буримов Н.И. 49, 476  
 Бурмистров Е.Р. 93  
 Бурмистров Е.Р. 444  
 Бурцев А.А. 47  
 Бусурин В.И. 586  
 Буташинов А.В. 490  
 Бухаров Д.Н. 282  
 Бучинская И.И. 496  
 Бушуев И.Ю. 512, 518  
 Быковский А.Ю. 221  
 Бычков С.Б. 193

#### **-В-**

Ванин А.И. 572  
 Варжель С.В. 215  
 Васильев В.В. 37  
 Васильев С.В. 223  
 Васильева О.Ф. 350  
 Васильев Г.Т. 324  
 Васильев Я.Д. 280  
 Васин А.А. 562  
 Вахрушев А.С. 504  
 Вашукевич Е.А. 109  
 Векшин М.М. 516, 528  
 Верещагин В.Ю. 592  
 Вернигор Н.А. 272  
 Вершинина О.В. 71  
 Вильчинский Д.П. 540  
 Виноградов Д.В. 187  
 Винокуров М.В. 183  
 Винс В.Г. 77  
 Витрик О.Б. 28  
 Вишневы А.А. 85

Вишняков Г.Н. 153  
 Власевич В.Д. 406  
 Власов С.В. 207  
 Власова И.В. 227  
 Войтешонок Ю.В. 412  
 Волжанкин Д.В. 452  
 Волков А.А. 274  
 Волков В.Г. 576, 580  
 Волков В.С. 33  
 Волков И.А. 177  
 Волов А.Д. 424  
 Волова Л.Т. 410, 424  
 Волошин Б.В. 278  
 Вольнова Д.А. 215  
 Воробьев А.К. 195  
 Врублевская Н.Р. 95  
 Врублевский И.А. 87  
 Вязовых М.В. 272  
 Вяткин С.В. 77

#### **-Г-**

Гавериловец В.А. 348  
 Гавериловец Д.А. 348  
 Гавериш С.В. 376  
 Гаверушко В.В. 574  
 Гагарина А.Ю. 87  
 Гадиров Р.М. 320, 400  
 Гайдук А.Е. 37, 278  
 Галактионов И.В. 209, 440, 450, 460, 578  
 Ганакин Н.Р. 432  
 Ганжерли Н.М. 630, 634  
 Гарматина А.А. 181, 386  
 Гататдинов Т.А. 262  
 Гейнц Ю.Э. 105, 121, 328  
 Герасимов Н.М. 123  
 Гиндин П.Д. 576, 580  
 Гладков Р.А. 37  
 Глебович Т.С. 324  
 Глубоков Д.Г. 416, 420  
 Глухоедова М.А. 322  
 Головина Т.Г. 490  
 Голодухина А.Н. 189  
 Голубев М.А. 434  
 Горбач Д.В. 466  
 Горбунов Н.А. 145  
 Гордеев С.В. 388, 390  
 Горяев М.А. 308  
 Гостилов С.О. 239  
 Градов В.С. 618

Граждан А.Л. 205, 588  
Греско В.Р. 266  
Григорьев К.С. 41  
Григорьев О.В. 157  
Гришачев В.В. 199  
Губин М.Ю. 33  
Гульм А.Д. 147  
Гуляев С.Н. 630, 634  
Гурский Д.С. 392  
Гусельников М.С. 31

**-Д-**

Давыдовская В.В. 494  
Даденков И.Г. 45  
Дайбаге Д.М. 330, 334  
Дайбаге Д.С. 330, 554  
Данилов В.А. 119  
Данилов П.А. 77  
Дворецкий Д.А. 356  
Девицкий О.В. 338  
Демин В.А. 51  
Денисов Д.Г. 251, 532, 538, 550, 556  
Дергачев А.А. 111  
Деримедведь Д.К. 398  
Дик Т.А. 95, 105  
Дмитриев А.А. 215  
Дмитриев Н.Ю. 189, 195  
Долганов В.К. 43  
Долганов П.В. 43  
Долгирев В.О. 472  
Долгоносоев В.К. 592  
Домакова В.А. 628  
Домарев С.Н. 316  
Донских В.К. 498  
Дорофеев А.А. 378  
Досколович Л.Л. 247  
Доценко А.А. 35  
Дрига М.Б. 618  
Дубынин С.Е. 259  
Дудка А.П. 490  
Дукельский К.В. 179  
Дуонг Ф.В. 77  
Дышлюк А.В. 28  
Дяденко М.В. 502

**-Е-**

Евстропьев С.К. 179, 322

Евсюхин З.Д. 442  
Евстихиев Н.Н. 544, 636, 640, 652  
Егоров А.Н. 398, 414  
Егоров В.К. 131  
Егоров Е.В. 131  
Егоров Ю.А. 568  
Езерский А.С. 620  
Елхимов Д.А. 139  
Епифанов Е.О. 398, 402  
Еров М.Н. 470  
Ерошенко З.А. 211  
Ерофеева А.А. 255  
Ершков М.Н. 384  
Есеев М.К. 79  
Ефременко В.Г. 85

**-Ж-**

Жанг Я. 304  
Жигарьков В.С. 65  
Житов В.А. 302  
Жоров П.В. 464  
Жубат А.С. 288  
Жукова М.О. 31  
Журавлев В.А. 51

**-З-**

Забелина Е.В. 490  
Завалей С.Н. 494  
Завалишина Л.Д. 197, 205, 588  
Завгородний Д.С. 558  
Завидовский И.А. 61  
Завьялов П.С. 83  
Загиров Т.Р. 438  
Зазуля Е.В. 478  
Замятин А.А. 213  
Захаров Л.Ю. 302  
Захаров М.А. 574  
Захарчук И.А. 330, 334  
Заякин О.А. 139  
Заяц К.В. 193  
Звягин А.Н. 652  
Зейниденов А.К. 300, 306  
Зеневич А.О. 500  
Зимин С.И. 426, 452, 454, 456, 464  
Зият А.З. 300  
Злобин А.О. 49, 476  
Злоказов Е.Ю. 262, 438, 446, 458,  
612, 642, 650  
Зубарева С.Р. 408

Зыкина А.А. 201  
Зырянов В.Я. 37  
Зырянова К.С. 59  
Зюбин А.Ю. 408

**-И-**

Ибраев Н.Х. 296  
Иванов А.В. 167  
Иванов А.Д. 207  
Иванов А.М. 474  
Иванов В.В. 562  
Иванов В.Н. 179  
Иванов Г.А. 352  
Иванов М.Г. 147  
Иванов П.А. 268  
Иванов С.И. 584  
Иванов С.С. 410  
Иванова А.И. 474  
Иванова В.С. 334  
Иванова Т.В. 558  
Иванчук А.Ю. 632  
Иванчук Д.Р. 632  
Иешкин А.Е. 89  
Измайлова Н.В. 320  
Иконников Д.А. 187, 542  
Инь Л.Х. 55, 318  
Инь Ю. 360  
Ионин В.В. 47  
Иршко О.А. 171  
Исамов А.Н. 151, 155, 536  
Исмагилов А.О. 31  
Исмаил А. 356  
Ишкинбаев Э.Д. 392  
Иштеев А.Р. 193

**-К-**

Кабак Е.В. 163  
Кабдиева А.У. 288  
Кадетова А.В. 478, 486  
Кадриев О.Р. 574  
Казаков В.И. 606  
Казаков И.И. 117  
Казанцев С.Ю. 436  
Казьмин М.И. 161, 438, 442  
Калашникова А.С. 614  
Калимуллин Э.Р. 476  
Калугин П.О. 564  
Калязина Д.В. 215  
Каплунов И.А. 474

Капогузов К.Е. 278  
Карабчевская А. 466  
Карасик В.Е. 356  
Карачевцева М.В. 229  
Каримов Д.Н. 496  
Каримова О.В. 336  
Карманов А.А. 298  
Карпач П.В. 324  
Карпов В.В. 576, 580  
Карпов Д.В. 83  
Карцев П.Ф. 372  
Касимова В.М. 490  
Кашапова Д.И. 264  
Каюмзода А.К. 488  
Квитко А.С. 127  
Керов А.А. 243  
Кесаев В.В. 69  
Кирий С.А. 638  
Киртаев Р.В. 33  
Киселев А.В. 47  
Кистенева М.Г. 480, 484  
Кичай В.Н. 278  
Климмин С.А. 55  
Клюев В.А. 272  
Князькин Д.Д. 314  
Ковадло П.Г. 618  
Коваленко А.Ф. 396  
Коваленко Н.В. 141  
Ковтун А.А. 272  
Кожевников В.А. 374  
Козлов А.А. 51  
Козлов А.В. 243, 274, 636, 652  
Козлов С.А. 31, 117  
Козлова Н.С. 490  
Козырев В.Д. 272  
Колесник Я.В. 426  
Колесников Д.С. 49  
Колесников О.В. 209, 440, 450, 460, 578  
Колисниченко В.В. 330  
Колмаков А.А. 480  
Колосов Г.А. 125, 127, 163  
Комов Э.В. 480, 484  
Комонов А.И. 37  
Комоцкий В.А. 624  
Кондаков А.А. 462  
Кондратенко В.С. 193  
Кондратов А.П. 592  
Конеев Р.В. 344  
Коновко А.А. 181

Константинов Ю.А. 203  
 Константинова А.Ф. 490  
 Копёнкин С.С. 259  
 Корибут А.В. 95  
 Коробкова А.В. 566  
 Коровой О.В. 346  
 Королева Т.В. 71  
 Королькова О.В. 594  
 Коршунов А.А. 386  
 Коршунов В.М. 63, 67  
 Косарева О.Г. 95  
 Косова Ю.А. 430  
 Костиков Д.А. 37  
 Костин А.А. 79  
 Кострицкий С.М. 482  
 Костромькина В.В. 422  
 Котов В.М. 229, 302  
 Котова А.Д. 356  
 Котова С.П. 139, 145, 237, 264, 404  
 Коханов А.В. 255  
 Кочергина О.В. 500  
 Красников Д.В. 620  
 Краснов В.В. 646  
 Крахалев М.Н. 37  
 Кремис И.И. 37  
 Кривецкая А.А. 143  
 Криман Н.М.Р. 181  
 Криштол В.В. 203, 508, 514, 524  
 Кроль И.М. 336  
 Круглов С.К. 225  
 Кудрявцев А.В. 534, 570  
 Кудряшов А.В. 556  
 Кудряшов С.И. 77  
 Кузнецов А.А. 99  
 Кузнецов А.С. 276  
 Кузнецов И.О. 372  
 Кузнецов П.И. 217  
 Кузнецов С.А. 576, 580  
 Кузнецов С.В. 83  
 Кузьмин Н.Н. 55, 318  
 Кулагина М.А. 348  
 Кулак Г.В. 606  
 Куликова Д.П. 57  
 Кулиш О.А. 516  
 Кундикова Н.Д. 147, 540  
 Кунец М.А. 165, 169  
 Купер К.Э. 83  
 Курилкина А.Н. 526  
 Курчанов А.Ф. 552

Кустов Д.М. 143  
 Кучеренко М.Г. 286, 294  
 Кучерик А.О. 99

#### **-Л-**

Лаэров А.П. 584  
 Лаэров С.Д. 546  
 Ламкин И.А. 290  
 Лантух Ю.Д. 326  
 Лапаева С.Н. 596, 600, 604  
 Ласкавый Н.С. 159, 524  
 Ласткин В.А. 574  
 Латышев А.В. 37  
 Лебедев В.Ф. 73, 81  
 Лебедев Н.Р. 402  
 Лебенкова С.К. 310, 312  
 Левкин В.В. 143  
 Левусь М.В. 95, 105  
 Леженин А.А. 618  
 Ленкова Ю.С. 648  
 Леонов В.А. 109  
 Лепилин А.В. 440  
 Лесной М.А. 37  
 Летова Е.Ю. 558  
 Лёвин Д.С. 598  
 Ли Ч. 360  
 Ли Ч. 368  
 Ливашвили А.И. 508  
 Линник Д.М. 37  
 Лиокумович Л.Б. 205, 588  
 Липатов Д.С. 173  
 Лихачев А.И. 89  
 Лобанов А.Н. 69  
 Лобанов В.Е. 368  
 Посевский Н.Н. 145, 237  
 Лотин А.А. 47  
 Лотков Е.С. 57  
 Лощенов В.Б. 143  
 Лузанов В.А. 302  
 Лупин А.В. 225  
 Любошенко В.А. 139  
 Люй П.Ц. 556  
 Лякин Д.В. 622  
 Ляликов А.М. 626  
 Ляхович Н.В. 568  
 Ляшенко А.В. 460

#### **-М-**

Магомедова А.А. 215

Майдыковский А.И. 35, 101, 125  
 Майорова А.М. 145  
 Майтама М.В. 542  
 Макаренкова Н.А. 566  
 Макаркин Г.Л. 69  
 Макаров В.А. 41  
 Макаров Д.Н. 79, 115  
 Макаров К.Н. 179  
 Макаров С.Н. 83  
 Макаров Ю.С. 37  
 Маковецкая Т.А. 197  
 Маковецкий А.А. 213  
 Максименко В.А. 508  
 Максимов А.И. 87  
 Максимов Д.В. 596, 600, 604  
 Максимов Е.А. 43  
 Максимова Л.А. 622  
 Малышев И.В. 207  
 Мальцев В.В. 318  
 Мамзинов М.Н. 139  
 Манучаров Д.Р. 253  
 Манцуров Н.Д. 37, 278  
 Маракулин А.С. 97, 304  
 Мареев Е.И. 65, 386  
 Мариничева К.А. 474  
 Маркварт А.А. 197, 205, 211, 588  
 Марков З.С. 642  
 Мартынов И.В. 61, 85  
 Мартынов И.Л. 107, 340  
 Мартыянов А.К. 75, 83  
 Маскевич А.А. 324  
 Маскевич С.А. 324  
 Матющенко Р.Д. 31  
 Маурер И.А. 630, 634  
 Махмудзода А.М. 492  
 Махсудов Б.И. 470  
 Машек И.Ч. 388, 390  
 Машошин Д.А. 538  
 Медведев А.Г. 71  
 Медведева Е.А. 280  
 Мельник М.В. 31  
 Мельникова А.М. 63  
 Мельникова Е.А. 466  
 Мендибаева А.Ж. 288  
 Месяцев М.А. 450  
 Мешков М.Н. 378  
 Мигаль Е.А. 103  
 Милехин А.Г. 37  
 Миловит Ф.О. 133

Милто А.Ю. 380  
 Мильшина Л.Д. 310, 312  
 Мин Ф.Х. 77  
 Минаев В.Л. 153  
 Минаев Н.В. 65, 181, 386, 398, 402,  
 414, 418  
 Минин И.В. 370  
 Минин О.В. 370  
 Минина О.В. 121  
 Миронов Л.Ю. 59  
 Мисникова Т.С. 73, 81  
 Мителло Н.В. 546  
 Михалевский В.А. 47  
 Мишель М. 484  
 Можеева М.Д. 386  
 Моисеев А.А. 37  
 Моисеева Е.О. 316  
 Молчанов В.Я. 608  
 Молчанова А.Д. 55  
 Мольков Т.С. 107  
 Морозов А.Е. 247  
 Морозов Д.В. 195  
 Морозов И.А. 318  
 Мошников В.А. 87  
 Муратов Д.А. 149  
 Муратова Е.Н. 87  
 Муратова К.К. 292  
 Мурашкина Т.И. 522  
 Мурзина Т.В. 35, 101, 125  
 Мусабекова А.К. 292  
 Мутилин С.В. 37, 278  
 Мухин Ю.В. 540  
 Мухуров Н.И. 500  
 Мысина Н.Ю. 622  
 Мясоедов А.В. 89

# -Н-

Набилкова А.О. 31  
 Навыко В.Н. 494  
 Надолинский А.М. 344  
 Назаренко Е.С. 332  
 Назарова Т.А. 384  
 Налбандян В.М. 294  
 Наниджанян А.К. 436  
 Напольский К.С. 35  
 Нащекин А.В. 89  
 Небавский В.А. 161, 442  
 Невзоров А.А. 47  
 Ненашев Т.Д. 442, 458

Неупокоева А.В. 404  
 Никитин Н.В. 239  
 Николаев Н.Э. 149  
 Николаева И.А. 95  
 Николаева И.Н. 382  
 Нифонтова Е.В. 504  
 Нищев К.Н. 177  
 Новиков В.Б. 35  
 Новиков И.Н. 255  
 Новиков С.М. 33  
 Норова А.А. 51

# **-О-**

Обронов И.В. 544  
 Овчинников А.С. 646  
 Огурцова К.М. 157  
 Окатая М.А. 456  
 Олейникова А.П. 45  
 Орехов И.О. 356  
 Орлов С.И. 245  
 Орлова А.О. 316, 332  
 Орлова Т.Н. 39, 468  
 Осадченко А.В. 330, 334  
 Осипов А.В. 99  
 Осичева А.Ю. 602  
 Осколкова Т.О. 316  
 Остриков С.А. 175  
 Отрохов С.Ю. 219  
 Охримчук А.Г. 133

# **-П-**

Павленко Д.В. 270, 650  
 Павлов В.И. 506, 510, 552  
 Павлов И.Н. 590, 594, 598  
 Павлов П.В. 253  
 Павлов С.В. 432  
 Павлова Е.К. 456  
 Павлова М.Д. 290  
 Палатников М.Н. 478, 486  
 Палатникова О.В. 486  
 Панина Е.К. 328  
 Панкратов А.Л. 562  
 Панов Н.А. 95  
 Пантелеева Е.П. 466  
 Патапович М.П. 380, 394, 406  
 Пауков М.И. 97, 304  
 Перминов А.В. 504, 514  
 Петрачков Д.Н. 155  
 Петров А.В. 211, 588

Петров А.В. 574  
 Петров В.А. 464  
 Петров Н.В. 39, 266, 468, 620  
 Петров Н.И. 119, 582  
 Петрова Е.К. 648  
 Петровский В.Н. 392  
 Петросян Я.В. 610  
 Петухов И.В. 51  
 Пивоваров П.А. 284  
 Пискунова Е.Р. 276  
 Плеханов А.А. 107  
 Плёткин А.П. 171  
 Плясцов С.А. 201  
 Погиба А.Ю. 592  
 Погода А.П. 249  
 Погожева А.Б. 548  
 Подзывалов С.Н. 476  
 Подсвилов О.А. 89  
 Позов Б.Е. 61  
 Полетаев Д.А. 554, 568  
 Полищук Г.С. 179  
 Полкотова О.Е. 528  
 Поляков А.В. 520, 526  
 Помазкин Д.А. 77  
 Пономарев А.И. 139  
 Попов В.В. 119  
 Попов В.С. 71  
 Попов И.А. 462  
 Попов М.В. 207  
 Попов М.Ю. 284  
 Попов С.М. 173, 213  
 Попова М.Н. 55  
 Попович А.Ф. 75  
 Потапенко А.О. 376  
 Потатуркин О.И. 245  
 Потёмкин Ф.В. 103  
 Почтарев И.С. 442  
 Прищепа О.О. 37  
 Проколова Д.В. 264  
 Прокудин Е.В. 644  
 Пронин А.С. 247  
 Проскурин А.А. 28  
 Проскуряков Д.А. 472  
 Просовский О.Ф. 151, 155, 536  
 Просовский Ю.О. 151, 155, 536  
 Прохоров А.В. 33  
 Прямоков А.Д. 133  
 Путилин А.Н. 259  
 Путилин Н.А. 259



Пучков Н.И. 572  
Пушкин А.В. 103  
Пчелкина Н.В. 444, 448  
Пятаков А.П. 546  
Пятибратов К.А. 241  
Пятышев А.Ю. 486

**-Р-**

Равин А.Р. 624  
Рагинов Н.И. 620  
Радивон А.В. 620  
Раков И.И. 620  
Ральченко В.Г. 284  
Рамос-Веласкес Л. 628  
Растрьгин Д.С. 472  
Ратова А.Д. 59  
Рахим А. 300  
Рахимова У.Дж. 470  
Рашидкызы М. 292  
Резцов Т.В. 39, 266, 468  
Речкунов С.Н. 37  
Решетова М.В. 181  
Ридер М.А. 332  
Ризаев Г.Э. 95, 105  
Ровенко В.В. 65  
Рогов С.А. 227  
Рогожников Г.С. 382, 422  
Родин В.Г. 243, 652  
Родионов И.А. 57  
Рожкова К.С. 288  
Романишкин И.Д. 143  
Ромащенко Р.В. 75  
Ропот П.И. 606  
Росляков И.В. 35  
Рудаков С.Д. 37  
Руднев О.Е. 534  
Рудый С.С. 167  
Румянцев Б.В. 103  
Рунина К.И. 314  
Русинов А.П. 286  
Рустем А.Ж. 306  
Рустемова А. 292  
Рыбалтовский А.А. 173  
Рывкина Я.А. 81  
Рыжков С.Г. 284  
Рыжов А.В. 334  
Рыжов И.В. 352  
Рыков И.Е. 542  
Рымов Д.А. 262, 438, 638, 640

Рябко А.А. 87  
Рябов Н.А. 410  
Рябухо В.П. 622  
Ряховский Д.В. 173, 213

**-С-**

Савельева Т.А. 143  
Савин А.В. 235  
Сагателян Г.Р. 276  
Садилов В.С. 508  
Сазонкин С.Г. 356  
Салеев А.Р. 432  
Салчак А.Х. 484  
Самоделкин Д.А. 169  
Самсонова Л.Г. 320  
Самусев И.Г. 408  
Самышкин В.Д. 99  
Сан Ш. 304  
Сандуленко А.В. 179  
Сапцина Т.Н. 139  
Сапцова О.А. 71  
Сарафанова М.В. 53  
Свиштунов А.С. 638, 640  
Севостьянов О.Г. 482  
Седов В.С. 75, 83  
Седова Ю.К. 65  
Селезнев В.А. 37, 278  
Селезнев Л.В. 95, 105  
Селюков А.С. 330  
Семенов А.П. 534  
Семенова Л.Е. 354, 358  
Сементин В.В. 249  
Семкив М.Т. 446  
Сергеев М.М. 266  
Серебряков А.Д. 522  
Сидоров Н.В. 486  
Сидорюк О.Е. 378  
Симонов И.М. 432  
Сингх Р. 129  
Синев Д.А. 628  
Ситникова М.Г. 298  
Скиданов Р.В. 247  
Скориков М.П. 77  
Слюсаренко С.С. 466  
Смакотина В.В. 336  
Смирнов А.М. 360  
Смирнов В.В. 548  
Смирнов К.А. 35, 101, 125  
Смирнов М.В. 486

Смолянинов В.А. 151, 155, 536  
 Соболева Е.В. 167  
 Советова А.Р. 514  
 Соколенко Б.В. 554, 568  
 Соколов И.А. 476  
 Соколов Ю.М. 119  
 Соколова Д.А. 89  
 Соколова Е.В. 562  
 Соловьев В.Г. 572  
 Солодова Т.А. 400  
 Солодовников А.А. 117  
 Солопов Г.В. 151, 536  
 Солохин С.А. 384  
 Сорокин Д.М. 247  
 Сорокин Н.И. 496  
 Сорокина А.Б. 616  
 Сотничук Е.О. 35  
 Софьин А.С. 404  
 Стариков Р.С. 161, 270, 438, 442,  
 458, 638, 640, 650

Степанов И.Г. 39, 468  
 Степанов М.А. 546  
 Стоякин В.В. 119  
 Стыркин И.С. 223  
 Судас Д.П. 217  
 Судьин А.В. 177  
 Сурина М.А. 348  
 Сурмай Р. 109  
 Суродин С.И. 37  
 Сутормин В.С. 37  
 Сутырин Д.В. 255  
 Сушко А.С. 550  
 Сыдых Б. 300  
 Сыч Д.В. 602, 614  
 Сую А.В. 61, 85 87

#### **-Т-**

Тайдаков И.В. 63, 67  
 Таламанова А.В. 612  
 Тарасов С.А. 290  
 Татаринцев А.А. 89  
 Тебенева Т.С. 368  
 Тезадов Я.А. 434  
 Телешевский В.И. 233, 570  
 Тельминов Е.Н. 400  
 Теретёнков А.Е. 123, 129  
 Терехин В.В. 157  
 Тимощенко Е.В. 113  
 Тимченко Е.В. 410, 416, 420, 424

Тимченко П.Е. 410, 416, 420, 424  
 Титко К.Д. 394  
 Титов Р.А. 478  
 Титова Е.И. 33  
 Тихомиров С.В. 193  
 Тихоневич О.В. 257  
 Токко О.В. 478, 486  
 Токсумаков А.Н. 33  
 Толстик А.Л. 45, 466  
 Топоровский В.В. 209, 440, 450, 460  
 Торубка В.Д. 428  
 Трещников В.Н. 239, 462  
 Трошин О.С. 610  
 Тумашев В.С. 37, 278  
 Турбин А.В. 37  
 Туров А.Т. 203  
 Тюнин А.Н. 586  
 Тяжелов И.А. 75, 83

#### **-У-**

У Цз. 360  
 Узилов С.Б. 245  
 Умаров М.Ф. 488, 492  
 Урмурзин Д.Д. 91  
 Урюпина В.К. 145  
 Усиевич Б.А. 119, 257  
 Устинов К.А. 498  
 Ушаков Н.А. 197, 205, 211, 588  
 Ушаков С.Н. 177  
 Ушаков Ф.А. 270, 650  
 Ушков А.А. 85

#### **-Ф-**

Фадеев С.В. 107  
 Фальков Д.Я. 476  
 Фандиенко И.Ю. 153  
 Фатеев А.Д. 338  
 Федоренко А.Ю. 356  
 Федоров В.А. 482  
 Федоров Е.К. 590  
 Федорова А.В. 494  
 Федорова И.А. 284  
 Федоткин М.Г. 400  
 Федянин А.А. 125, 127, 137, 163, 560  
 Фейзер К.А. 37  
 Ферулев А.И. 67  
 Филатов В.В. 348  
 Филонов В.Д. 205, 588  
 Филохин Г.А. 141

Фирстов С.В. 175  
Фомченков С.А. 632  
Французова Д.М. 420

**-Х-**

Хабибуллин Р.А. 183, 187, 542  
Хакимов К.Т. 71  
Халилов С.И. 596, 600, 604  
Хамина К.А. 416  
Ханенко Ю.В. 247  
Харасов Д.Р. 239  
Харахордин А.В. 175  
Харисова Р.Д. 59  
Харнас С.С. 143  
Хатыров Н.П. 506, 510, 552  
Хлопцева Д.С. 454  
Холёвский А.Н. 344  
Хоронжук Р.С. 388, 390  
Худайберганов Т.А. 282  
Хунсюнь Ю. 197

**-Ц-**

Царев В.С. 133  
Целиков Г.И. 85  
Целогородцев К.А. 237  
Цибикова А.И. 632  
Циплакова Е.Г. 620  
Цориева А.В. 63  
Цыпкин А.Н. 31

**-Ч-**

Чабуркин Д.А. 404  
Чаморовский Ю.К. 173  
Чебакова С.А. 348  
Чекунов И.В. 388, 390  
Черёмхин П.А. 243, 274, 636, 638,  
640, 646, 652  
Чермошенцев Д.А. 165, 169, 185, 189,  
195, 207, 368  
Чернухин А.А. 424  
Черных А.В. 39, 266, 468, 620  
Четверин Р.С. 137, 560  
Чехлова Т.К. 149  
Чиж С.А. 448  
Чижиков А.И. 608  
Чиликина П.А. 376  
Чинь Н.Х. 380, 394, 406  
Чиркова И.М. 482  
Чистяков А.А. 107, 340

Чмерева Т.М. 342  
Чможев Т.Н. 63  
Чубаров Д.М. 472  
Чувызгалов А.А. 508  
Чурсина Ю.А. 414

**-Ш-**

Шагалиев Р.М. 37  
Шайдуллин Р.И. 191, 434  
Шакин О.В. 606  
Шаленов А.С. 414, 418  
Шандаров С.М. 49, 476, 480  
Шарангович С.Н. 472  
Шарафисламов А.А. 578  
Шарипова М.И. 137, 560  
Шаронова Ю.О. 504  
Шатров К.Д. 340  
Швец Н.А. 452, 454  
Шевцова А.Д. 504  
Шелаяев А.В. 57  
Шепелев А.Е. 384  
Шестериков А.В. 33  
Шикин А.С. 173  
Шипило Д.Е. 95  
Шипицын А.В. 524  
Шипко В.В. 610  
Шитиков А.Е. 165, 169, 189, 195, 368  
Шитц Д.В. 412  
Шифрина А.В. 438, 644, 646, 648  
Шихавцов М.А. 342  
Шиховцев А.Ю. 618  
Шишков Г.М. 41  
Шкурская Ю.А. 520  
Шленов С.А. 111  
Шмидт А.А. 49, 476  
Шоболов Е.Л. 37  
Шоболова Т.А. 37  
Шорохов А.С. 125, 127, 163  
Шугуров А.И. 53  
Шулбаева Д.С. 422  
Шулепов П.В. 410  
Шулындин П.А. 103  
Шумский Е.В. 153  
Шуткин Г.А. 290

**-Щ-**

Щекин А.С. 392  
Щербак В.С. 608

Щербинин Д.П. 616  
Щуко А.В. 394

**-Э-**

Эгамов М.Х. 470

**-Ю-**

Юдин Н.Н. 476  
Юревич В.А. 113  
Юрин В.А. 37  
Юров В.Ю. 284  
Юсупов В.И. 65, 418  
Юшков К.Б. 608

**-Я-**

Якимук В.А. 215  
Яковкина Л.В. 278  
Яковлев В.О. 71  
Яковленко М.М. 544  
Якубов С.И. 596, 600, 604  
Якубовский Д.И. 33, 97, 304  
Якушова Н.Д., 298  
Яндыбаева Ю.И. 215  
Яников М.В. 572  
Ярыгин М.А. 432, 436  
Яшин С.В. 79