

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

---

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

**СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ**

Москва

УДК 535(06)+004(06)

ББК 72г

Н 34

**VI МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФОТОНИКЕ И  
ИНФОРМАЦИОННОЙ ОПТИКЕ: Сборник научных трудов.** М.: НИЯУ МИФИ,  
2017. – 664 с.

Сборник научных трудов содержит доклады, включенные в программу VI Международной конференции по фотонике и информационной оптике, проходившей 1–3 февраля 2017 г. в г. Москве. Тематика конференции охватывает широкий круг вопросов: когерентная и нелинейная оптика, оптика кристаллов, волоконная и интегральная оптика, взаимодействие излучения с веществом и оптические материалы, оптическая связь, цифровая оптика и синтез дифракционных оптических элементов, голография и оптическая обработка информации, оптоэлектронные устройства, прикладные вопросы оптики.

Ответственный редактор Родин В.Г.

Статьи получены до 30 ноября 2016 года.

Материалы издаются в авторской редакции.

ISBN 978-5-7262-2333-9

© Национальный исследовательский  
ядерный университет «МИФИ», 2017

Подписано в печать 18.01.2017. Формат 60×84 1/16.

Печ. л. 41,5. Тираж 320 экз. Заказ №6.

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

## ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

### Председатели:

- Гуляев Ю.В. – Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва
- Евтихий Н.Н. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
- Альтшулер Г.Б. – Корпорация IPG-Medical, Мальборо, США
- Вишняков Г.Н. – Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва
- Волостников В.Г. – Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН
- Габитов И.Р. – Университет Аризоны, Тусон, США
- Десятников А.С. – Австралийский национальный университет, Канберра, Австралия
- Козлов С.А. – Университет ИТМО, Санкт-Петербург
- Комоцкий В.А. – Российский университет дружбы народов, Москва
- Компанец И.Н. – Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва
- Криштоп В.В. – Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск
- Кульчин Ю.Н. – Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток
- Лавров А.П. – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
- Маймистов А.И. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
- Малов А.Н. – Иркутский государственный медицинский университет
- Маломед Б. – Тель-Авивский университет, Израиль
- Манькин Э.А. – Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва
- Нипполайнен Э. – Университет Восточной Финляндии, Куопио, Финляндия
- Одинокоев С.Б. – Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
- Потатуркин О.И. – Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск
- Проклов В.В. – Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, Москва
- Стариков Р.С. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
- Твердохлеб П.Е. – Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск
- Толстик А.Л. – Белорусский государственный университет, Минск
- Фетисов Ю.К. – Московский технологический университет (МИРЭА)
- Шандаров С.М. – Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

## ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

### Председатель:

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

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

## СОДЕРЖАНИЕ

КРАСНОК А.Е., МАКАРОВ С.В., САМУСЕВ А.К., КИВШАРЬ Ю.С., БЕЛОВ П.А. Кремниевая нанофотоника.....	26
РЯБУШКИН О.А. Концепция эквивалентной температуры в фотонике.....	28
МОЛЧАНОВ В.Я., ЮШКОВ К.Б. Обработка сверхбыстрых лазерных полей акустооптическими методами с частотами субтерагерцового диапазона.....	30
КРИШТОП В.В., ГОНЧАРОВА П.С., ТОЛСТОВ Е.В., МАКСИМЕНКО В.А., ЛИВАШВИЛИ А.И., ЛИТВИНОВА М.Н., КИРЕЕВА Н.М., ЕФРЕМЕНКО В.Г., СЮЙ А.В., ПОПОВА А.В. Интерференционный управляемый светофильтр для широкополосного излучения.....	32
АНДРЕЕВ А.Л., АНДРЕЕВА Т.Б., КОМПАНЕЦ И.Н. Условия получения безгистерезисной непрерывной серой шкалы в дисплейной ячейке с негеликоидальным сегнетоэлектрическим жидким кристаллом.....	34
СИДОРОВ Н.В., ПАЛАТНИКОВ М.Н. Оптические свойства и вторичная структура монокристаллов ниобата лития.....	36
МАМБЕТОВА К.М., АРЕСТОВ С.И., ОРЛИКОВ Л.Н., ШАНДАРОВ С.М., КУЛЕШОВ Ю.В. Динамика пироэлектрической генерации электронного пучка монокристаллическими образцами ниобата лития.....	38
МАШКОВИЧ Е.А., СЫЧУГИН С.А., БАКУНОВ М.И. Преобразование ультракоротких лазерных импульсов в узкополосное терагерцовое излучение в кристалле ниобата лития.....	40
НАЛБАНТОВ Н.Н., СТРОГАНОВА Е.В., ГАЛУЦКИЙ В.В. Пороговые энергетические характеристики 1,5 мкм лазерной генерации в градиентных кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ и $\text{LiNbO}_3:\text{Er}, \text{Yb}$ .....	42
КАПЛУНОВ И.А., ГЕРАСИМОВ В.В., КОЛЕСНИКОВ А.И. Оптическое пропускание монокристаллического германия в области $40\text{-}700 \text{ см}^{-1}$ .....	44
НОВИКОВ В.Б., МАЙДЫКОВСКИЙ А.И., МАНЦЫЗОВ Б.И., МУРЗИНА Т.В. Эффект Бормана в одномерных фотонных кристаллах в геометрии Лауэ.....	46
ЧУМАНОВ М.В., ПАРГАЧЁВ И.А., СЕРЕБРЕННИКОВ Л.Я., КРАКОВСКИЙ В.А. Устройства генерации второй гармоники лазерного излучения на основе кристаллов РКТР с регулярными доменными структурами.....	48
ВАЛИТОВА А.Ф., КОРЮКИН А.В., ХАМАДЕЕВ М.А. Экстраординарное отражение гибридного фотон-плазмонного кристалла.....	50
БИКБАЕВ Р.Г., ПАНКИН П.С., ВЬЮНЫШЕВ А.М. Оптические таммовские состояния на границе фотонного кристалла и нанопористого серебра.....	52

КОЗЛОВ А.А., АБДУЛЛАЕВ С.Д., КАРПОВ В.М., ИВАНОВ А.В. Сенсоры химических веществ на основе фотонных кристаллов из полимерных микросфер.....	54
КРАЙСКИЙ А.А., КРАЙСКИЙ А.В. О возможном механизме повышения выхода низкоэнергетических ядерных реакций в кристаллических структурах.....	56
ДАЙНЕКО С.В., ХЕНДСБИ А.Д., УЭЛЧ Г.Ч. Экологически чистый процесс производства не содержащих фуллерены органических солнечных ячеек с эффективностью более 4.8%.....	58
АНЦЫГИН В.Д., МАМРАШЕВ А.А., НИКОЛАЕВ Н.А., ПОТАТУРКИН О.И. Исследование фотоиндуцированного фазового перехода полупроводник- металл в пленках VO <sub>2</sub> спектроскопическими методами.....	60
МУРАВСКИЙ Ал.Ан., МУРАВСКИЙ Ан.Ал. Градиентные ориентирующие слои для жидкокристаллических линз.....	62
ШАПИРО Б.И., НЕКРАСОВ А.Д., МАНУЛИК Е.В. Металлокомплексные J-агрегаты полиметиновых красителей как фотосенсоры в органической электронике.....	64
АДАМОВ Г.Е., ГРЕБЕННИКОВ Е.П., ПОРОШИН Н.О., ШМЕЛИН П.С. Исследование влияния наночастиц силиката серебра на фотоотклик бактериородопсина.....	66
ГОРЯЕВ М.А. Сенсибилизированный красителями фотоэффект в кремнии.....	68
ПИЧУГИН И.С., ИГНАТЬЕВ А.И. Хлоридные фототерморефрактивные стекла.....	70
БЫЧКОВ А.Б., КОЖИНА А.С., МИТЮРЕВА А.А., РЕЗИКЯН А.Г., СМИРНОВ В.В. Динамика фотоионизации атома лития под действием мощного ультракороткого рентгеновского излучения.....	72
БУШМАКИН В.С., КОЖОКАРУ И.С., ЦЫГАНОВ В.В., ЛУЧНИКОВ И.А., ДАВЛЕТОВ Э.Т., КУБЛИКОВА Д.Н., ПЯТЧЕНКОВ С.В., СУКАЧЕВ Д.Д., АКИМОВ А.В. Фотоиндуцированные столкновения ультрахолодных атомов тулия.....	74
БЕЛЬКО Н.В., САМЦОВ М.П., ГУСАКОВ Г.А., ТАРАСОВ Д.С. Спектральные свойства наноструктур индотрикарбоцианинового красителя..	76
АЛИЕВ С.А., ТРОФИМОВ Н.С., ЧЕХЛОВА Т.К. Особенности пленок диоксида титана, синтезированных гель методом.....	78
КОНСТАНТИНОВА Е.И., БРЮХАНОВ В.В. Безызлучательный резонансный перенос энергии между молекулами антрацена и квантовыми точками CdZnSZnS и CdZnSeS в пленках полиметилметакрилата.....	80
ВИКУЛИН Д.В., АЛЕКСЕЕВ К.Н., ЯВОРСКИЙ М.А. Новый механизм акустооптического взаимодействия в оптических волокнах.....	82

ПОРОХОВНИЧЕНКО Д.Л., ДЬЯКОНОВ Е.А., ВОЛОШИНОВ В.Б. Оптимальные параметры акустооптического взаимодействия в кристалле КРС-5.....	84
КУПРЕЙЧИК М.И., БАЛАКШИЙ В.И. Акустооптическое взаимодействие вблизи оптических осей в оптически активных двуосных кристаллах.....	86
АНТОНОВ С.Н., ФИЛАТОВ А.Л. Акустооптический метод управления энергетическим профилем лазерного луча.....	88
ПЕТРОВ Н.И., ПУСТОВОЙТ В.И. Акустооптический резонатор со сверхузкой шириной полосы пропускания...	90
ИВАНОВ С.И., ЛАВРОВ А.П., МОЛОДЯКОВ С.А., САЕНКО И.И. Двухкоординатный акустооптический процессор для оценки параметров радиоизлучения пульсаров.....	92
МУХАМАДИЕВ А.А. Формирование полностью оптической информационно-измерительной системы на основе акустооптических элементов.....	94
БЕЛКИН М.Е., КЛЮШНИК Д.А. Применение фотонного подхода для построения соединительных линий передачи сверхширокополосных радиосигналов.....	96
ЗЛОКАЗОВ Е.Ю., НЕБАВСКИЙ В.А., СТАРИКОВ Р.С. Разработка математической модели радиофотонной системы выборки с оптическим демультимплексированием по длине волны.....	98
ВИНОГРАДОВА И.Л., СУЛТАНОВ А.Х., АНДРИАНОВА А.В. Принципы построения волоконно-оптического устройства chirпирования и задачи, выполняемые устройством.....	100
АВЕРЧЕНКО А.В., ЗОТОВ А.М., КОРОЛЕНКО П.В., ПАВЛОВ Н.Н. Эскалация возмущений волнового фронта световых пучков в приемопередающих трактах оптических систем.....	102
ЗАЧИНЯЕВ Ю.В., ПЛИВАК С.А., ШУМИЛИН А.С. Защищенная система передачи данных на основе технологии VLC с интерфейсом PLC.....	104
БОРЦЕВ О.В., СКОРОТЕЦКИЙ М.С., СУРИН Н.М., ПОНОМАРЕНКО С.А. Наноструктурированные кремнийорганические люминофоры как новый класс органических люминофоров.....	106
КУЗЬМИН Н.Н., БОЛДЫРЕВ К.Н., ДОБРЕЦОВА Е.А. Исследование люминесцентных свойств галлиевых боратов со структурой хантита.....	108
КУРОЧКИНА М.А., КОНШИНА Е.А. Изменение люминесцентных свойств квантовых точек CdSe/ZnS в ЖК матрице под действием электрического поля.....	110
СТРОКОВА Ю.А., СВЯХОВСКИЙ С.Е., САЛЕЦКИЙ А.М. Кинетика тушения люминесценции молекул донора в одномерном фотонном кристалле на основе окисленного пористого кремния.....	112

КОРШУНОВ В.М., АМБРОЗЕВИЧ С.А., ТАЙДАКОВ И.В., ВИТУХНОВСКИЙ А.Г. Люминесцентные свойства комплексов на основе $\beta$ -дикетонатов скандия (III).....	114
МЕТЛИН М.Т., АМБРОЗЕВИЧ С.А., МЕТЛИНА Д.А., ТАЙДАКОВ И.В., ВИТУХНОВСКИЙ А.Г. Люминесценция пиразолсодержащего 1,3-дикетонатного комплекса Pr (III) с 1,10-фенантролином.....	116
БУХАРИН М.А., СКРЯБИН Н.Н., ХУДЯКОВ Д.В., ВАРТАПЕТОВ С.К. Анализ тепловых процессов перманентного изменения показателя преломления под действием фемтосекундного излучения в кумулятивном режиме.....	118
БОЛДЫРЕВ К.Н., ПОПОВА М.Н. Сверхтонкая структура в спектрах кристалла $\text{LiYF}_4\cdot\text{Ho}^{3+}$ во внешнем магнитном поле.....	120
ОСИПОВ Е.В., БЕЛОГОРЛОВ А.А., МАРТЫНОВ И.Л., ДОВЖЕНКО Д.С., ЧИСТЯКОВ А.А. Новый способ внедрения сопряженных полимеров в фотонные структуры из пористого кремния.....	122
ГАРТМАН А.Д., МАЙДЫКОВСКИЙ А.И., СВЯХОВСКИЙ С.Е., МИТЕТЕЛО Н.В., ЕВЛАШИН С.А., МУРЗИНА Т.В. Двухфотонное поглощение в композитных материалах на основе оксида графена и оксида графена с наночастицами серебра.....	124
ХАРИТОНОВ А.В., ХАРИНЦЕВ С.С., ФИШМАН А.И., САЛАХОВ М.Х. Генерация сигнала вынужденного комбинационного рассеяния света в плазмонном микрорезонаторе Фабри-Перо из нитрида титана.....	126
ЗЕМСКОВ К.И., КАРПОВА О.В., КУДРЯВЦЕВА А.Д., МИРОНОВА Т.В., ПЕРШИН С.М., ПЕТРОВА Е.К., СТРОКОВ М.А., ЧЕРНЕГА Н.В. Вынужденное низкочастотное комбинационное рассеяние в суспензиях вирусов табачной мозаики и вирусов картофеля (АВК и ХВК) .....	128
КОЛЫМАГИН Д.А., ЗВАГЕЛЬСКИЙ Р.Д., ЧУБИЧ Д.А., ВИТУХНОВСКИЙ А.Г. Создание 3D-периодических нано/микроструктур для фотоники методом прямого лазерного письма.....	130
МИНАЕВ Н.В., ТАРХОВ М.А., ДУДОВА Д.С., БАГРАТАШВИЛИ В.Н. Нелинейная фемтосекундная оптическая литография.....	132
МЕНСОВ С.Н., ПОЛУШТАЙЦЕВ Ю.В. Оптическое согласование световодов в фотополимеризующихся средах.....	134
БОГАЧКОВ И.В., ТРУХИНА А.И. Проблемы мониторинга современных волоконно-оптических линий связи...136	136
ДМИТРИЕВА К.А., БОРОДАКО К.А., ШЕЛЯКОВ А.В., ИВАНОВ А.А., ТИМОФЕЕВ А.А. Использование лазерного излучения для создания микромеханических элементов с обратимой памятью формы.....	138
ВАНИН А.И., СОЛОВЬЕВ В.Г. Моделирование резонанса Фано в наноструктурированном материале.....	140

ГАВРУШКО В.В., ИОНОВ А.С., КАДРИЕВ О.Р., ЛАСТКИН В.А. Оптические характеристики дифференциальных фотоприемников на основе кремния.....	142
ЛОГАЧЕВ П.А., РУЖИЦКАЯ Д.Д., РЫЖИКОВ С.Б., РЫЖИКОВА Ю.В. Самоорганизация фрактальных кластеров дендритных образований.....	144
ЯКУШЕНКОВ П.О., БАЛАКЛЕЙСКИЙ Н.С. Фотонные интегральные схемы.....	146
МАСАЛЬСКИЙ Н.В. Квазиодномодовые оптические волноводы на основе структуры “кремний на изоляторе”.....	148
УКОЛОВ Д.С., ЕГОРОВ А.Н., МАВРИЦКИЙ О.Б., ПЕЧЕНКИН А.А., ЧУМАКОВ А.И. Повышение разрешающей способности лазерных методов диагностики субмикронных полупроводниковых структур с помощью твердотельных иммерсионных линз.....	150
ОДИНОКОВ С.Б., САГАТЕЛЯН Г.Р. Экспериментальные исследования плазмохимического травления стекла.....	152
Трибельский М.И. Особенности рассеяния света частицами с большим коэффициентом преломления.....	154
ВОЛОСТНИКОВ В.Г. Оптические вихри: прошлое, настоящее и будущее.....	156
БАРАЧЕВСКИЙ В.А., КРАЮШКИН М.М., КИЙКО В.В. 3D побитовая оптическая память на основе светочувствительных органических соединений.....	158
АРАКЕЛЯН С.М., КУЧЕРИК А.О., КУТРОВСКАЯ С.В., ОСИПОВ А.В., ХОРЬКОВ К.С., ИСТРАТОВ А.В. Топологические элементы фотоники: проявление квантово-размерных эффектов в оптических характеристиках и электропроводимости.....	161
МАЙМИСТОВ А.И., ЛЯШКО Е.И. Нелинейные поверхностные волны на границе раздела диэлектрика и топологического изолятора.....	163
МАКАРОВ В.А., ПЕТНИКОВА В.М. Адиабатическая модуляция кноидальной волны бризером Ахмедиева.....	165
МЕЛЬНИК М.В., ЦЫПКИН А.Н., КОЗЛОВ С.А. Теоретический анализ зависимости времени когерентности суперконтинуума от коэффициента фазовой модуляции.....	167
КАЗАНЦЕВА Е.В. Распространение уединённых волн в брэгговской решётке, содержащей пространственную неоднородность поляризации нелинейной резонансно поглощающей периодической среды.....	169
ШЕСТЕРИКОВ А.В., ГУБИН М.Ю., ГЛАДУШ М.Г., ПРОХОРОВ А.В. Формирование субпикосекундных плазмонных импульсов при использовании коллективных эффектов в волноводном спазере.....	171



БАХВАЛОВА Т.Н., ГЛАДЫШЕВ И.В., ШАНДРЮК Н.Г. Моделирование потерь в интегральном оптическом волноводе на базе различных материальных платформ.....	173
ЛЯШКО Е.И., МАЙМИСТОВ А.И. Дисперсионные характеристики планарного гиперболического волновода с нелинейной сердцевинной.....	175
АКИМОВ А.А., ИВАХНИК В.В., НИКОНОВ В.И. Амплитудные и пространственные характеристики четырехволнового преобразователя излучения на тепловой нелинейности в схеме с положительной обратной связью.....	177
ИВАХНИК В.В., САВЕЛЬЕВ М.В. Нестационарное четырехволновое взаимодействие в прозрачной нанождкости.....	179
КУЛЯ М.С., СЕМЕНОВА В.А., ОБРЫВКИН А.С., БЕСПАЛОВ В.Г. Исследование групповой и фазовой скоростей распространения импульсов терагерцового излучения вихревых и квазибесселевых пучков.....	181
БЫЛИНА М.С., ЧАЙМАРДАНОВ П.А. Компьютерная модель усилителя EDFA с несколькими источниками сигналов и накачек.....	183
ЦИБУЛЬНИКОВА А.В., БРЮХАНОВ В.В. Моделирование коэффициентов плазмонного усиления в кластере из двух серебряных наночастиц.....	185
ГЛАДЫШЕВ А.В., КОСОЛАПОВ А.Ф., КОЛЯДИН А.Н., ПРЯМИКОВ А.Д., БИРЮКОВ А.С., ЯЦЕНКО Ю.П., БУФЕТОВ И.А. Рамановская генерация на длине волны 1,9 мкм в заполненном водородом револьверном световоде с двойными капиллярами.....	187
ЕГОРОВ Ф.А., ПОТАПОВ В.Т. Динамика волоконных лазеров на основе активных микро-(нано) световодов с модулируемым спонтанным временем жизни.....	189
НОСОВ П.А., МАРТЫНОВ Г.Н. Анализ оптических систем, формирующих излучение мощных волоконных лазеров.....	191
ВЕРГЕЛЕС С.С., ОГОРОДНИКОВ Л.Л., ЛЕБЕДЕВ В.В., КОЛОКОЛОВ И.В. Отличие статистики излучения случайного волоконного лазера от гауссовой.....	193
ДУРАЕВ В.П., МЕДВЕДЕВ С.В. Перестраиваемые одночастотные полупроводниковые лазеры и их применение.....	195
ТОМИЛОВ С.М., ТАРАБРИН М.К., ЛАЗАРЕВ В.А., ШЕЛЕСТОВ Д.А. Система термостабилизации активной среды твердотельного лазера среднего ИК-диапазона.....	197
КОЗЛОВСКИЙ К.И., ЛИСОВСКИЙ М.И., ПЛЕХАНОВ А.А., ЧИСТЯКОВ А.А. Особенности широкополосного терагерцового излучения малоиндуктивного разряда с лазерным инициированием.....	199

СОРОКИН Ю.В.	
Сумматор на фотонных кристаллах.....	201
КОЗЛОВ Д.А., КОТЛЯР В.В.	
Острая фокусировка лазерного света двухслойным микроцилиндром с круглым сечением.....	203
ВАСИЛЬЦОВ В.В., ГАЛУШКИН М.Г., ПАНЧЕНКО В.Я.	
Динамические характеристики процесса образования каналов в биотканях под воздействием излучения CO <sub>2</sub> лазера.....	205
РЕПИН В.Э., НИКИТИН Д.Г., ТЫРТЫШНЫЙ В.А.	
Сравнение порогов лазерного разрушения оптических просветляющих покрытий SiO <sub>2</sub> /Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> .....	207
КОРОННОВ А.А., САФУТИН А.Е., ЗЕМЛЯНОВ М.М., ЗВЕРЕВ Г.М.	
Стойкость фотодиодов к засветке лазерным излучением.....	209
<b>ЩЕЛЕВ М.Я.</b> , МЕШКОВ О.И., ШАШКОВ Е.В.	
Применение пикосекундных стрик-камер для диагностики электронных сгустков в ускорителях.....	211
ИВАНОВ А.Д., МИНЬКОВ К.Н., САМОЙЛЕНКО А.А.	
Оптический микрорезонатор как первичный преобразователь высокочувствительного сенсора.....	213
БАРЫШНИКОВ Н.В., ДЕНИСОВ Д.Г., КАРАСИК В.Е., КРАСНОВА Е.В., ОРЛОВ В.М.	
Анализ влияния шумов в методе дифференциального рассеяния на погрешность измерения параметров шероховатости нанометрового уровня профилей оптических деталей.....	215
ВЕДЯШКИНА А.В., РИНКЕВИЧЮС Б.С., ПАВЛОВ И.Н.	
Исследование диффузионного слоя жидкости с помощью рефракции структурированного лазерного излучения.....	217
БУСУРИН В.И., КОРОБКОВ В.В., ДЬЯЧКОВ В.В.	
Интерферометрический метод обработки информации твердотельных волновых гироскопов.....	219
МАКИН В.С., ГЛУЩЕНКО Л.А., ПЕСТОВ Ю.И.	
Дистанционная регистрация пульсовой волны.....	221
СТЕПАНОВ В.А., БЕЛЫХ В.В., АЙЗИКОВИЧ А.А.	
Информационно-энтропийный метод картирования органов грудной клетки человека на основе мультифрактального анализа структуры рентгенограмм.....	223
ЗВЕРЖХОВСКИЙ В.Д., КРЕТУШЕВ А.В., ЕВДОКИМОВ А.А., ФЕТИСОВ Ю.К.	
Сравнение методов фазовой микроскопии для исследования живых Т-лимфоцитов.....	225
ТАЛАЙКОВА Н.А., РЯБУХО В.П.	
Проявление пространственной когерентности в дифракционной фазовой микроскопии.....	227
ПАВЛОВ И.Н., РИНКЕВИЧЮС Б.С., ТОЛКАЧЕВ А.В., ВЕДЯШКИНА А.В.	
Применение метода поверхностного плазмонного резонанса для визуализации фазовых переходов в пристеночном слое капли воды.....	229

АРТЮКОВ И.А., БУСАРОВ А.С., ВИНОГРАДОВ А.В., ПОПОВ Н.Л. Рентгеновская литография и микроскопия при наклонном расположении масок и объектов.....	231
КОМОЦКИЙ В.А., СОКОЛОВ Ю.М., СУЕТИН Н.В. Устройство для периодической модуляции лазерного излучения.....	233
ГИБИН И.С., НЕЖЕВЕНКО Е.С. Опτικο-электронная свёрточная нейронная сеть для распознавания изображений.....	235
БЫКОВСКИЙ А.Ю., ЩЕРБАКОВ А.А. Модели многозначной логики для описания процедур классификации объектов.....	237
ПАВЛОВ А.В. Влияние свойств регистрирующих сред на эффективность выделения коррелированных фрагментов методом наложенных голограмм.....	239
ИВАНОВ П.А. Полиномиальные и ДСС-фильтры в задачах распознавания геометрически искаженных изображений.....	241
БУСУРИН В.И., КНЯЗЬ В.А., КОРОБКОВ К.А. Метод обработки совмещенной «грубо-точной» информации в системах расознавания жестов.....	243
КОТОВ В.М., ШКЕРДИН Г.Н., АВЕРИН С.В. Выделение контура оптического изображения с использованием акустооптических фильтров из гиротропного материала.....	245
ВЕРЕНИКИНА Н.М., КОВАЛЕВ М.С., КОЛОСОВА Е.С., МАЛИНИНА П.И. Методика коррекции фазовых искажений излучения на основе дифракционных оптических элементов.....	247
КРАСНОВ В.В., МИНАЕВА Е.Д. Применение метода прямого поиска со случайной траекторией для снижения ошибки синтеза фазовых дифракционных оптических элементов.....	249
АРТЮКОВ И.А., ИРТУГАНОВ Н.Н. Нелинейная фильтрация шумов с автоподбором параметров при микротомографическом исследовании малоконтрастных объектов.....	251
ЕВТИХИЕВ Н.Н., СТАРИКОВ Р.С., ЧЕРЁМХИН П.А. Методика оперативного и точного измерения временных шумов фото- и видеокамер.....	253
КАПРАНОВ В.В., МАЦАК И.С., ТУГАЕНКО В.Ю., БЛАНК А.В. Двухкамерная система технического зрения со спектральным удалением шума.....	255
МОЩЕВ И.С., КУЗНЕЦОВ П.А. Фотомодуль 320x256 на основе InGaAs/InP для активно-импульсных формирователей изображения.....	257
ТОЛСТИК А.Л. Поляризационная динамическая голография.....	259

МОРОЗОВ А.В., ПУТИЛИН А.Н., ДУБЫНИН С.Е., КОПЕНКИН С.С., БОРОДИН Ю.П.	
Когерентные осветительные системы для голографических дисплеев.....	261
ШЕВКУНОВ И.А., ПЕТРОВ Н.В., КАТКОВНИК В.Я.	
Метод восстановления внеосевых голограмм на основе разнонаправленных несимметричных окон и правила пересекающихся доверительных интервалов.....	264
КАЛЕНКОВ Г.С., КАЛЕНКОВ С.Г., КИСЕЛЕВ В.А., КЛИМЕНКО С.В.	
Виртуальное окружение как техника визуализации гиперспектральных голограмм.....	266
ПЕТРОВ Н.В., ШЕВКУНОВ И.А., БЕЛАШОВ А.В., НАЛЕГАЕВ С.С., ПУТИЛИН С.Э., ЛИН Й.-Ч., ЧЖЭН Ч.-Ж.	
Осевая голография с разрешением во времени для исследования оптического нелинейного взаимодействия.....	268
НАЙДЕН Л.А., ЦЫГАНОВ И.К., ОДИНОКОВ С.Б.	
Исследование методов получения цветных голографических изображений с помощью дифракционных решеток.....	270
ЗИНОВЬЕВ А.П.	
Оптимизация метода реконструкции данных в цифровой голографии.....	272
ЗЛОКАЗОВ Е.Ю., КОВАЛЕВ М.С., КРАСИН Г.К., МАЛИНИНА П.И., ОДИНОКОВ С.Б., ТАЛАЛАЕВ В.Е.	
Численный расчет голограмм Френеля для датчика волнового фронта.....	274
ПАВЛОВ П.В., МАЛОВ А.Н., ПОПОВ Ф.Н.	
Способ идентификации дефектов во внутренней структуре композитных материалов методом цифровой спекл-фотографии.....	276
ДЬЯЧЕНКО А.А., РЯБУХО В.П.	
Проявление пространственных и временных спектральных свойств оптической системы в полихроматической интерференционной микроскопии.....	278
ГУРЫЛЕВ О.А., ОДИНОКОВ С.Б., ЛУШНИКОВ Д.С., ЖЕРДЕВ А.Ю., ШИШОВА М.В.	
Разработка и исследование оптической системы датчика линейных перемещений на основе четырёхсекционной дифракционной решётки.....	280
КРАЙСКИЙ А.В., ПОСТНИКОВ В.А., ШЕВЧЕНКО М.А., СУЛТАНОВ Т.Т.	
О точности определения концентрации глюкозы в плазме крови с помощью голографических сенсоров.....	282
АНГЕРВАКС А.Е., АКСЕНОВА К.А., РЫСКИН А.И.	
Методика создания объемных голографических фильтров для среднего ИК-диапазона спектра.....	284
ШЕПЕЛЕВИЧ В.В., МАКАРЕВИЧ А.В., ШАНДАРОВ С.М.	
Зависимость выходных характеристик голограмм от толщины кристалла ВТО.....	286
РОМАШКО Р.В., АСАЛХАНОВА М.А., КУЛЬЧИН Ю.Н.	
Адаптивный интерферометр на основе ортогонального трехволнового взаимодействия в фоторефрактивном кристалле.....	288

АШУРОВ М.С., ГОРЕЛИК В.С., КЛИМОНСКИЙ С.О. Оптические свойства одномерных фотонных кристаллов.....	290
КРАЙСКИЙ А.А., КРАЙСКИЙ А.В. О свойствах увеличения амплитуды поля вблизи края запрещенной зоны одномерного фотонного кристалла.....	292
ПРУДНИКОВ И.Р. Резонансное возрастание интенсивности световой волны в интерферометре, состоящем из двух 1D фотонных кристаллов и тонкой разделительной пленки.....	294
КРЮКОВА И.С., МАРТЫНОВ И.Л., ДОВЖЕНКО Д.С., ЧИСТЯКОВ А.А. Моделирование оптических свойств гибридных структур на основе одномерного фотонного кристалла с внедренными люминофорами методом FDTD.....	296
КОРЮКИН А.В., САЛАХОВ М.Х. Пропускание гибридных фотон-плазмонных кристаллов, полученных методом самосборки.....	298
ВЬЮНЬШЕВ А.М., БИКБАЕВ Р.Г., ПАНКИН П.С., СВЯХОВСКИЙ С.Е. Формирование полос пропускания в квазипериодических фотонных кристаллах.....	300
ИНЮШОВ А.В., ТРУШНИКОВ И.А., САФРОНОВА П.К., САРКЫТ А., ШАНДАРОВ В.М. Оптическое индуцирование одномерных фотонных структур с бесселеподобным профилем в ниобате лития.....	302
ТЕПЛЯКОВА Н.А., СИДОРОВ Н.В., ПАЛАТНИКОВ М.Н. Оптические свойства кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}(0.02):\text{Zn}(4.34)$ мол.% .....	304
СЮЙ А.В., КИЛЕ Е.О., ПРОКОПИВ Н.Н., СИДОРОВ Н.В., ПАЛАТНИКОВ М.Н. Исследование однородности кристаллов ниобата лития интерференционно-поляризационным методом.....	306
ВЕРХОТУРОВ А.О., ШАНДАРОВ В.М. Оптическое формирование дифракционных структур в ниобате лития с фоторефрактивным поверхностным слоем.....	308
МАНУКОВСКАЯ Д.В., СИДОРОВ Н.В., ПАЛАТНИКОВ М.Н. Фрактальный анализ картин фотоиндуцированного рассеяния света монокристаллов ниобата лития с низким эффектом фоторефракции.....	310
ЛИТВИНОВА М.Н., ПОГОДИНА В.А., СЮЙ А.В., КРИШТОП В.В., СИДОРОВ Н.В., ПАЛАТНИКОВ М.Н. Преобразование широкополосного ИК-излучения и структурный беспорядок в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$ .....	312
ПУСТОЗЕРОВ А.В., РЯБЧЁНОК В.Ю. ШАНДАРОВ В.М. Влияние некогерентной фоновой подсветки на знак нелинейно-оптического отклика кристалла ниобата лития.....	314
ГАЛУЦКИЙ В.В., КУЗОРА В.Ф., СТРОГАНОВА Е.В. Использование градиентного PPLN: $\text{Er}^{3+}$ для усиления оптических сигналов.....	316

ПИКУЛЬ О.Ю., СИДОРОВ Н.В., ТЕПЛЯКОВА Н.А., ПАЛАТНИКОВ М.Н. Оптическая однородность монокристаллов ниобата лития конгруэнтного состава.....	318
СЮЙ А.В., КИЛЕ Е.О., ПРОКОПИВ Н.Н., СИДОРОВ Н.В., ПАЛАТНИКОВ М.Н. Электрооптические свойства кристалла ниобата лития.....	320
ДЮ В.Г., КИСТЕНЕВА М.Г., ШАНДАРОВ С.М., МОШКИНА М.Д. Спектры оптического поглощения кристалла $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca}$ , подвергнутого последовательной засветке коротковолновым и длинноволновым излучением.....	322
ИВАНОВА А.И., ТРЕТЬЯКОВ С.А., СЛОБОДЯНЮК К.А., ТАРГОНИЙ А.А. Влияние параметров поверхности на оптическое пропускание монокристаллов германия.....	324
ТРЕТЬЯКОВ С.А., КАПЛУНОВ И.А., ТАРГОНИЙ А.А., СЛОБОДЯНЮК К.А. Определение коэффициентов излучения кристаллов германия с различной шероховатостью поверхности.....	326
МОЛЧАНОВА А.Д., БОЛДЫРЕВ К.Н. Узкие резонансные линии в терагерцовом спектре монокристалла $\text{Cu}_3\text{V}_2\text{O}_6$ : природа и свойства.....	328
ИВАНОВА С.В. Несоразмерные фазы в нанодоменном кристалле.....	330
ХУДЯКОВА Е.С., ШАНДАРОВ С.М., КИСТЕНЕВА М.Г., ДЮ В.Г., СМИРНОВ С.В., КОРНИЕНКО Т.А. Термоиндуцированные изменения в оптическом поглощении в нелегированных кристаллах германата висмута.....	332
АНАНЬЕВ П.С., МАРТЫНОВ И.Л., ОСИПОВ Е.В., ДОВЖЕНКО Д.С., ЧИСТЯКОВ А.А. Влияние температуры на оптические свойства микрорезонаторов из пористого кремния.....	334
КОЛЕСНИКОВ А.И., КАПЛУНОВ И.А., ЛЯХОВА М.Б., ТРЕТЬЯКОВ С.А., АЙДИНЯН Н.В. Азимутальные максимумы в индикатрисах отражения света полированными поверхностями монокристаллов.....	336
ИЛЬИНА Е.А., ХМЕЛЕВ А.Ю., ЮРИНА У.В., СИДОРОВ А.И. Электронно-лучевая запись оптической информации в кристаллах $\text{LiF}$ и $\text{KBr}$ .....	338
СОКОЛЕНКО Б.В., ПОЛЕТАЕВ Д.А., КОВАЛЕВА А.О., ПЕТРОВ Н.В., ШЕВКУНОВ И.А. Преобразование фазы сингулярных пучков, распространяющихся в одноосном кристалле.....	340
КОСТРИЦКИЙ С.М., КОРКИШКО Ю.Н., ФЕДОРОВ В.А. Электрооптический переключатель $1 \times 2$ на основе канальных волноводов в кристаллах $\text{LiNbO}_3$ .....	342
ДЬЯКОНОВ Е.А., ПОРОХОВНИЧЕНКО Д.Л. Полуколлинеарный режим взаимодействия терагерцевых электромагнитных волн с ультразвуком в кристалле парателлурита.....	344

НИКИТИН П.А. Квазиортогональная акустооптическая дифракция на закрученном звуковом пучке.....	346
АКИМОВА Я.Е., ЕГОРОВ Ю.А., ХАЛИЛОВ С.И. Экспериментальное исследование возмущенного пучка Бесселя-Гаусса, сформированного конусом волновых векторов, переносящего дробный топологический заряд.....	348
ИСМАИЛОВ И.А., ЛАПАЕВА С.Н. Топологические реакции в одноосных кристаллах при распространении правоциркулярно поляризованного оптического кварка.....	350
КОВАЛЕВА А.О., РЫБАСЬ А.Ф., ПЕТРОВ Н.В., ШЕВКУНОВ И.А. Преобразования угловых моментов в циркулярно поляризованном сингулярном пучке с дробным топологическим зарядом.....	352
КУЗЯКОВ Б.А., ИВАНОВ П.А., СКВОРЦОВ Е.А., ТИХОНОВ Р.В. Качество проходящих лазерных пучков в возмущенной атмосфере.....	354
ПЛЁНКИН А.П. Обнаружение фотонного импульса синхронизации в системе квантового распределения ключа.....	356
ЗЛОКАЗОВ Е.Ю., КРАСНОВ В.В., НЕБАВСКИЙ В.А., ОСИПОВ В.Г., СОЛЯКИН И.В., СТАРИКОВ Р.С., ЧЕРЁМХИН П.А. Макет радиофотонной системы выборки.....	358
ПЕТРОВ Н.И., ДАНИЛОВ В.А., ПОПОВ В.В., УСИЕВИЧ Б.А. Субволновые дифракционные решетки видимого диапазона.....	360
БОГАЧКОВ И.В., ТРУХИНА А.И. Повышение эффективности обнаружения каналов утечки в оптических волокнах.....	362
КУЗЯКОВ Б.А., ИВАНОВ П.А., ПЛОСКИРЕВ А.Е., СКВОРЦОВ Е.А., Совершенствование волоконно-оптического блока согласования для комплексированных линий телекоммуникаций.....	364
ЧАЙМАРДАНОВ П.А. Новая методика расчета оптического усилителя EDFA на основе волокна, легированного ионами эрбия.....	366
БОГАЧКОВ И.В., КОМПАНЕЕЦ О.Е. Исследование рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в одномодовых оптических волокнах с особыми профилями.....	368
БОГАЧКОВ И.В. Исследование температурных зависимостей бриллюэновского сдвига частоты в оптических волокнах различных видов.....	370
БОГАЧКОВ И.В. Экспериментальное исследование бриллюэновского сдвига частоты от продольных растяжений в оптических волокнах различных видов.....	372
РОМАЩУК Е.В. Нелинейные эффекты на дальних расстояниях.....	374

ДАНИЛОВ П.А., КУДРЯШОВ С.И., ЛИТОВКО Е.П., УМАНСКАЯ С.Ф. Реактивное магнетронное напыление и исследование металл-диэлектрических метаповерхностей с околонулевой диэлектрической проницаемостью.....	376
ВОЙЦЕХОВСКИЙ А.В., КУЛЬЧИЦКИЙ Н.А., НЕСМЕЛОВ С.Н., ДЗЯДУХ С.М. МДП-структуры на основе варизонного МЛЭ HgCdTe для инфракрасных детекторов.....	378
ВОЙЦЕХОВСКИЙ А.В., КУЛЬЧИЦКИЙ Н.А., НЕСМЕЛОВ С.Н., ДЗЯДУХ С.М. Влияние освещения на адмиттанс МДП-структур на основе варизонного МЛЭ HgCdTe.....	380
КУЗНЕЦОВ П.И., АВЕРИН С.В., ЖИТОВ В.А., ЗАХАРОВ Л.Ю., КОТОВ В.М. Фотодетектор видимой части спектра на основе сверхрешетки ZnSe/ZnTe....	382
ИВАНОВ В.И., ПЕРКОВ Ю.О. Фотоприемник излучения на основе сэндвичной системы металл-сегнетоэлектрик-металл.....	384
ГАНЖЕРЛИ Н.М., ГУЛЯЕВ С.Н., МАУРЕР И.А. Создание голографических структур на композите из бихромированного желатина и органического полимера.....	386
МОГИЛЬНЫЙ В.В., СТАНКЕВИЧ А.И., ТРОФИМОВА А.В., БЕЗРУЧЕНКО В.С. Фотонаведённая планарная ориентация ЖК на слоях бензальдегидных полимеров с длинными боковыми алкильными цепями.....	388
ШКУРАК И.Н., СЕЛЮКОВ А.С., ВИТУХНОВСКИЙ А.Г., ИСАЕВ А.А., КОРШУНОВ В.М., ВАСИЛЬЕВ Р.Б. Фотоиндуцированная нелинейность в коллоидных растворах планарных и сферических нанокристаллов CdSe.....	390
БОЖЕНКО М.В., РАСИН А.Б., ЧУСОВИТИН Е.А., ЯН Д.Т. Фотолюминесцентные свойства пористого кремния, сформированного на подложках, обработанных плазмой.....	392
СОЛОВЕЙ В.Р., СЕЛЮКОВ А.С., ВИТУХНОВСКИЙ А.Г., ВАСИЛЬЕВ Р.Б., ЛАЗАРЕВА Е.П. Фотофизические свойства нанокристаллов CdTe планарной геометрии во внешнем электрическом поле.....	394
АСАДУЛЛИНА А.Р., ХАРИНЦЕВ С.С. Фотоиндуцированные поверхностные деформации тонких пленок азополимера.....	396
КОМИССАР Д.А., СЕЛЮКОВ А.С., ВИТУХНОВСКИЙ А.Г., ВАСИЛЬЕВ Р.Б., КУРОЧКИН Н.С., СОЛОВЕЙ В.Р. Фёрстеровский перенос энергии в органическом светоизлучающем диоде с планарными нанокристаллами CdSe.....	398
КИСЛОВ Д.А. Моделирование солнечных ячеек Гретцеля с плазмонными наночастицами серебра.....	400
ОНИЩУК С.А., МУРАДОВА А.С. Исследование деградации кремниевых солнечных элементов при облучении их протонами.....	402



ИВАНОВ В.И., ИВАНОВА Г.Д.	
Светоиндуцированная термодиффузия наночастиц.....	404
КОЛЧИН А.В., ПУГАЧЕВ Д.Ю., ТКАЧЕНКО Н.Б., ЕФИМОВА А.И., ЗАБОТНОВ С.В., ГОЛОВАНЬ Л.А.	
Эффективное диффузное рассеяние света массивами кремниевых нанонитей.....	406
КУЧЕРЕНКО М.Г., КИСЛОВ Д.А.	
Плазмон-активизированный межмолекулярный безызлучательный перенос энергии в сферических нанореакторах.....	408
КОНСТАНТИНОВА Е.И., МАТВЕЕВА К.И., БРЮХАНОВ В.В.	
Экситон-плазмонное взаимодействие квантовых точек типа CdZnS/ZnS и CdZnSeS с наночастицами серебра в пленке полиметилметакрилата.....	410
ИВАНОВА Г.Д., КИРЮШИНА С.И., МЯГОТИН А.В.	
Динамические голограммы в наносуспензии.....	412
КУЧЕРЕНКО М.Г., НАЛБАНДЯН В.М.	
Структура ближнего поля слоистого наноцилиндра с замагниченной металлической жилой и экситоногенной оболочкой.....	414
ЕГОРЫШЕВА А.В., ДУДКИНА Т.Д., ГАЙТКО О.М., РУДНЕВ П.О.	
Спектры комбинационного рассеяния твердых растворов $Vi_{1,8}Fe_{1,2(1-x)}Ga_{1,2x}SbO_7$ со структурой пирохлора.....	416
РУСИНОВ А.П., КУЧЕРЕНКО М.Г., ГОРШКОВ А.В.	
Некогерентное насыщение поглощения растворов молекул органических красителей с добавлением металлических наночастиц.....	418
ВОЛКОВА О.И., БАРАНОВ А.Н.	
Изменение степени ассоциации красителей в обратных мицеллах АОТ в гептане.....	420
ОВЕЧЕНКО Д.С., БОЙЧЕНКО А.П.	
Локализация электрохемилюминесценции на алюминиевом аноде с диэлектрическими покрытиями.....	422
ДМИТРИЕВА М.Д., ХАРИНЦЕВ С.С., ФИШМАН А.И., АЛЕКСЕЕВ А.М., САЛАХОВ М.Х.	
Определение поляризации света в сканирующей микроскопии ближнего поля на основе поверхностных деформаций азополимерной тонкой пленки.....	424
ЧЕРНЫХ Е.А., ХАРИНЦЕВ С.С., ФИШМАН А.И., АЛЕКСЕЕВ А.М., САЛАХОВ М.Х.	
Определение температуры стеклования тонких азополимерных пленок в свободном состоянии и на подложках с помощью атомно-силовой микроскопии.....	426
КОТЛИКОВ Е.Н., НОВИКОВА Ю.А., ЮРКОВЕЦ Е.В.	
Измерение оптических констант пленки $CaY_2F_8$ .....	428
ТИХОМИРОВА Н.С., СЛЕЖКИН В.А., ЗЮБИН А.Ю., БРЮХАНОВ В.В.	
Плазмонное усиление флуоресценции и комбинационного рассеяния молекул эозина на поверхности анодированного алюминия, допированного наночастицами серебра.....	430

ИСМАГИЛОВ А.О., АНДРЕЕВА Н.В., АНДРЕЕВА О.В. Исследование оптической неоднородности нанопористых силикатных матриц.....	432
ЧЕРНОВ А.И., ФЕДОТОВ П.В., ОБРАЗЦОВА Е.Д. Изменение оптических свойств одностенных углеродных нанотрубок при их заполнении полосами графена.....	434
МОЛЧАНОВА А.Д., МОШКИНА Е.М., БОЛДЫРЕВ К.Н. Исследование магнитных фазовых переходов в многоподрешеточном магнетике $Cu_xMn_{1-x}V_2O_4$ методами оптической поляризационной спектроскопии.....	436
КОЗЛОВА Д.А., ИВАНОВ С.А., ПИЧУГИН И.С. Влияние концентрации редкоземельного активатора на динамику полосы плазмонного резонанса в фототерморефрактивном стекле.....	438
ЧЕРНАКОВ Д.И., СИДОРОВ А.И., СТОЛЯРЧУК М.В. Формирование люминесцентного волновода в фототерморефрактивном стекле под действием УФ-излучения.....	440
КРЫКОВА В.А., ИВАНОВ С.А., ДУБРОВИН В.Д. Голографические свойства хлоридного фототерморефрактивного стекла.....	442
БАБКИНА А.Н., ТРОЦЬ К.И., НИКОНОРОВ Н.В. Образование центров окраски в боратных стеклах с нанокристаллами $CuCl$ под действием УФ-излучения.....	444
СТОЛЯРЧУК М.В., КОЧЕТКОВ П.В., СИДОРОВ А.И. Расчет оптических свойств молекулярных кластеров $Ag-Cu$ в фосфатных стеклах из первых принципов.....	446
ГОРБЯК В.В., СИДОРОВ А.И. Многоуровневая запись оптической информации в серебросодержащих стеклах.....	448
КОБРАНОВА А.А., СИДОРОВ А.И. Чувствительный элемент датчика температуры на основе стекла с $Eu$ и молекулярными кластерами $Ag$ .....	450
ЦИБУЛЬНИКОВА А.В., МЫСЛИЦКАЯ Н.А., СЛЕЖКИН В.А., БРЮХАНОВ В.В., ЗЕМЛЯКОВА Е.С. Взаимодействие плазмонов наночастиц серебра различного происхождения с молекулами сывороточного альбумина.....	452
ФАТХУТДИНОВА Л.И., НЕПОМНЯЦАЯ Э.К., ВЕЛИЧКО Е.Н., АКСЕНОВ Е.Т. Исследование свойств магнитных жидкостей методом поляриметрии.....	454
САВЧЕНКО Е.А., НЕПОМНЯЦАЯ Э.К., ДЮБО Д.Б., ВЕЛИЧКО Е.Н., ЦЫБИН О.Ю. Новая схема регистрации флуоресценции в биомолекулярных жидкостях.....	456
КУЗЬМИНА Т.Б., АНДРЕЕВА Н.В., АНДРЕЕВА О.В. Анализ параметров биологических жидкостей методом динамического рассеяния.....	458
КИРЮШИНА С.И., МЯГОТИН А.В. Нелинейно-оптическая диагностика наножидкостей.....	460
ЛИВАШВИЛИ А.И., КРИШТОП В.В., КОСТИНА Г.В., ЛИХОВОДОВА Т.Б. Динамика теплопроводности наножидкости, находящейся в световом поле.....	462

АВЕРБУХ Б.Б., АВЕРБУХ И.Б. Распространение плоской S-поляризованной электромагнитной волны в цилиндрических наностержне и нанотрубке.....	464
КАРЦЕВ П.Ф., КУЗНЕЦОВ И.О. Учет взаимодействия с фонами при моделировании процесса термализации бозе-газа поляритонов.....	466
БЫЧКОВ А.Б., КОЖИНА А.С., МИТЮРЕВА А.А., СМИРНОВ В.В. Модификация тракторного метода для оценки вероятности многофотонной ионизации.....	468
ХАЛЯПИН В.А., БУГАЙ А.Н. Фотоионизация и подавление вынужденного комбинационного саморассеяния.....	470
АСТАШКЕВИЧ С.А. Информационная энтропия высоковольтных колебательных состояний изотопологов димера лития.....	472
ХОПЁРСКИЙ А.Н., НАДОЛИНСКИЙ А.М., КОНЕЕВ Р.В. Слияние рентгеновских фотонов в поле атомного иона.....	474
МАКИН В.С., МАКИН Р.С. О модели разрушения кварцевого стекла УКИ-излучением.....	476
ДОБРИНА Д.А., ВЕЙКО В.П., ЛЕБЕДЕВА Е.В., СИНЕВ Д.А. Алюмосиликатная тонкостенная сфера, индуцируемая лазерным излучением: экспериментальное исследование кинетики процесса образования.....	478
ОРЕХОВ И.О., ДВОРЕЦКИЙ Д.А., САЗОНКИН С.Г., КУДЕЛИН И.С., ПНЕВ А.Б., КАРАСИК В.Е., ДЕНИСОВ Л.К. Особенности генерации и распространения фемтосекундных импульсов в полностью волоконном кольцевом эрбиевом лазере с высоконелинейным резонатором.....	480
КРОЛЕВЕЦ О.С., ЛЕВИЦКИЙ М.Е. Экспериментальная установка для формирования распределения интенсивности с помощью управления фазами в многоканальной системе волоконных лазеров.....	482
РЯБЧУК С.В., ГОНЧАРОВ С.А., МОКРОУСОВА Д.В., СЕЛЕЗНЕВ Л.В., СУНЧУГАШЕВА Е.С., УСТИНОВСКИЙ Н.Н., ШУТОВ А.В., ЗВОРЫКИН В.Д. Подавление множественной филаментации субтераваттного лазерного излучения в ксеноне.....	484
ГОНЧАРОВ С.А., РЯБЧУК С.В., ШУТОВ А.В., ЗВОРЫКИН В.Д., СУНЧУГАШЕВА Е.С., МОКРОУСОВА Д.В. Регуляризация множественной УФ-филаментации в воздухе методом амплитудных масок.....	486
МАКИН В.С., МАКИН Р.С. Филаментация лазерного излучения в прозрачных конденсированных средах и формирование объемных решеток.....	488
НИКОЛАЕВ Д.А., ЦВЕТКОВ В.Б., ШАМАТОВА А.И. Nd:GGG дисковый лазер с трёхлучковой диодной накачкой.....	490

ИОНИН А.А., КИНЯЕВСКИЙ И.О., КЛИМАЧЕВ Ю.М., КОЗЛОВ А.Ю., КОТКОВ А.А., СТЕПАНИЦЕВ В.В., ХАФИЗОВ И.Ж.	
Структура спектра генерации суммарных частот неселективного лазера на окиси углерода в кристалле $ZnGeP_2$ .....	492
ГАЛУШКИН М.Г., ЯКУНИН В.П., ДЬЯЧКОВ Р.Г.	
Влияние насыщения поглощения излучения диодной накачки в кристалле $YAG:Yb$ на параметры волноводных планарных лазеров.....	494
КОЗЛОВСКИЙ К.И., КОТКОВСКИЙ Г.Е., МИТЯГИН Ю.А., ПИРЯЗЕВ И.Н., ПЛЕХАНОВ А.А., ЧИСТЯКОВ А.А.	
Стенд на основе фемтосекундного лазера и интерферометра Майкельсона для исследования терагерцового излучения фотопроводящих антенн.....	496
АКМАЛОВ А.Э., КОЗЛОВСКИЙ К.И., КОТКОВСКИЙ Г.Е., ПИРЯЗЕВ И.Н., ПЛЕХАНОВ А.А., ЧИСТЯКОВ А.А.	
ТГц-спектр на основе фотопроводящих антенн и полосовых резонансных ТГц-фильтров.....	498
ГАНИН Д.В., ЛАПШИН К.Э., ОБИДИН А.З., ВАРТАПЕТОВ С.К.	
Одноимпульсное перфорирование тонких прозрачных диэлектриков с помощью фемтосекундных лазеров.....	500
АКОВАНЦЕВА А.А., ЮСУПОВ В.И., РЫБАЛТОВСКИЙ А.О.	
Особенности формирования структур под действием непрерывного и импульсного лазерного излучения в пленках термостабильных полимеров.....	502
СМИРНОВ В.В., АЛЫКОВА О.М., БЕЗНИСКО Е.И., КУРАМШИН К.В.	
Оптимизация состава и параметров монокристаллических пленок феррит-гранатов под задачи прикладной оптоэлектроники.....	504
ПОЛТАЕВ Ю.А., СЕРГЕЕВ М.М., ЗАКОЛДАЕВ Р.А., КОВАЛЬ В.В.	
Фемтосекундная запись волноводов в объеме пористого силикатного стекла.....	506
КОВАЛЬ В.В., СЕРГЕЕВ М.М., ЗАКОЛДАЕВ Р.А., РЫМКЕВИЧ В.С., ПОЛТАЕВ Ю.А.	
Изготовление фазовых решеток лазерной микроплазмой для интерференционных схем микрообработки.....	508
БАЗЗАЛ Х., ФАДАИЯН А.Р., ВОРОПАЙ Е.С., ЗАЖОГИН А.П.	
Исследования процессов образования нитрида алюминия в плазме в зависимости от угла падения сдвоенных лазерных импульсов на алюминиевый сплав Д16Т в атмосфере воздуха.....	510
КОЗЛОВСКИЙ К.И., МЕЛЕХОВ А.П.	
Генерация терагерцового излучения плазмой лазерно-инициируемой вакуумной искры.....	512
КУШВАРА Д.А., ПЛИВАК С.А., ШУМИЛИН А.С.	
Система охлаждения в лазерах на парах металлов.....	514
РОГОЖНИКОВ Г.С., РОМАНОВ В.В., МИШИНА И.В.	
Использование пикосекундной стрик-камеры для диагностики параметров сверхкоротких лазерных импульсов в многоканальных лазерных установках.....	516

СМИРНОВ А.А., ГАЗИЗОВ И.М., ОЛЬНЕВ А.А., ФЕДОРКОВ В.Г., КАПЛУНОВ И.А. Измерение характеристик CZT детекторов при оптическом возбуждении носителей заряда с возможностью сканирования лазерным пучком.....	518
<b>ЩЕЛЕВ М.Я.</b> , МЕШКОВ О.И., ВЕРЕЩАГИН А.К. Разработка, калибровка и применение пикосекундного диссектора нового поколения.....	520
БЕЛУХИНА Ю.Ю., ЛЮБИМОВ А.И., РОГОЖНИКОВ Г.С., РОМАНОВ В.В. Оптимизация параметров стретчера и компрессора для многоканальной петаваттной лазерной установки.....	522
РОГОЖИН М.В., РОГАЛИН В.Е., КРЫМСКИЙ М.И. Двухкомпонентные выходные окна в лазерных системах высокой мощности.....	524
ДУДОВА Д.С., БАРДАКОВА К.Н., ХОЛХОЕВ Б.Ч., ФАРИОН И.А., ОЧИРОВ Б.Д., БУРДУКОВСКИЙ В.Ф., ТИМАСHEВ П.С., МИНАЕВ Н.В. Формирование трехмерных структур на основе термостабильных гетероцепных полимеров методом лазерной стереолитографии.....	526
ЛЮБИМОВ А.И., РОМАНОВ В.В. Оптимизация энергетических характеристик диэлектрических дифракционных решеток для компрессии лазерных импульсов.....	528
ГАЛУШКИН М.Г. Эффективность использования лазерного пучка в процессе газолазерной резки материалов.....	530
ЯКУНИН В.П., ГРИГОРЬЯНЦ А.Г., ФУНТИКОВ В.А. Характеристики генерации виртуальной и реальной линеек одномодовых лазерных диодов при некогерентном спектральном суммировании пучков в устойчивых резонаторах с дифракционной решеткой.....	532
РОГОВ П.Ю., ПУТИЛИН С.Э., НАЛЕГАЕВ С.С., ЧЖЭН Ч.-Ж., БЕСПАЛОВ В.Г. Взаимодействие фемтосекундного лазерного излучения с кожей человека: экспериментальное подтверждение математической модели.....	534
ФАРРАХОВА Д.С., МАКАРОВ В.И., ЛОЩЕНОВ В.Б. Оценка приживления кожных трансплантатов с использованием наночастиц фталоцианина алюминия и индоцианина зеленого методами лазерной спектроскопии.....	536
МАЛОВ А.Н., НОВИКОВА Е.А., ВАЙЧАС А.А. О механизме влияния лазерного излучения на минералообразование в препаратах желчи.....	538
ШАРОВА А.С., МАКЛЫГИНА Ю.С., РОМАНИШКИН И.Д., ЛОЩЕНОВ В.Б. Исследование молекулярных нанокристаллов бактериохлорина в качестве агентов для проведения гипертермической терапии злокачественных новообразований.....	540
ТИМЧЕНКО Е.В., ТИМЧЕНКО П.Е., ЗАРУБИНА Е.Г., БУРЕНКОВ Е.С., АСАДОВА А.А., ИТЯКСОВ Ю.Д. Исследование эффективности лечения стафилококковой инфекции в нёбных миндалинах методом спектроскопии комбинационного рассеяния.....	542

ЛЫКИНА А.А., АРТЕМЬЕВ Д.Н., БРАТЧЕНКО И.А., ХРИСТОФОРОВА Ю.А., МЯКИНИН О.О., КУЗЬМИНА Т.П., ДАВЫДКИН И.Л., ЗАХАРОВ В.П. Анализ биологических жидкостей с различными концентрациями с помощью метода спектроскопии комбинационного рассеяния.....	544
ТИМЧЕНКО Е.В., ТИМЧЕНКО П.Е., ДОЛГУШКИН Д.А., ВОЛОВА Л.Т., АСАДОВА А.А., ФЕДОРОВА Я.В., ПРАВЕДНИКОВ С.И. Исследование структурных особенностей костных тканей крыс методом спектроскопии комбинационного рассеяния.....	546
ТИМЧЕНКО Е.В., ТИМЧЕНКО П.Е., ВОЛОВА Л.Т., ДОЛГУШКИН Д.А., МАРКОВА М.Д., ЯГОФАРОВА Е.Ф. Анализ суставной жидкости с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния.....	548
ШАМИНА Л.А., БРАТЧЕНКО И.А., АРТЕМЬЕВ Д.Н., МЯКИНИН О.О., МОРЯТОВ А.А., КОЗЛОВ С.В., ЗАХАРОВ В.П. Рамановская и флуоресцентная спектроскопия биологических жидкостей для диагностики рака.....	550
ТИМЧЕНКО П.Е., ТИМЧЕНКО Е.В., ВОЛОВА Л.Т., ДОЛГУШКИН Д.А., ФРОЛОВ О.О., МЕЩЕРЯКОВ В.Д., БАЛМАСОВ А.В. Оптическая оценка изменения состава костных имплантатов в процессе их обработки.....	552
ТИМЧЕНКО Е.В., ТИМЧЕНКО П.Е., ВОЛОВА Л.Т., ШАЛКОВСКАЯ П.Ю., ТРАПЕЗНИКОВ Д.С. Спектральный анализ структурных изменений клапанов сердца на различных этапах их децеллюляризации.....	554
ПЕРЕСКОКОВ В.С., ГОРИШНИЙ В.А., ДЗЕДОЛИК И.В. Управление плазмон-поляритонными вихрями.....	556
МАКАРОВ В.А., ПЕТНИКОВА В.М., РЫЖИКОВ П.С., <b>ШУВАЛОВ В.В.</b> ЯДВИЧУК А.В. Эллиптически поляризованный бризер в изотропной гиротропной нелинейной среде.....	558
СКОБНИКОВ В.А., ГОРОДЕЦКИЙ А.А., КУЛЯ М.С. Численное моделирование пространственной когерентности источника импульсного терагерцового излучения на основе нелинейно-оптического преобразования.....	560
АЛЕКСЕЕВ К.Н., БАРШАК Е.В., ЯВОРСКИЙ М.А. Высшие резонансные моды скрученных анизотропных волокон.....	562
ЗОЛОТОВСКИЙ И.О., ЛАПИН В.А., СЕМЕНЦОВ Д.И. Модуляционная неустойчивость волновых пакетов, распространяющихся в неоднородном световоде.....	564
КОВАЛЕВА А.О., АЛЕКСЕЕВ К.Н., РЫБАСЬ А.Ф., ПЕТРОВ Н.В., ШЕВКУНОВ И.А. Эволюция света в циркулярном массиве оптических волокон.....	566
ХАЛИЛОВ С.И., ИБРАГИМОВ А.Э., РЫБАСЬ А.Ф., АКИМОВА Я.Е. Моделирование собственного модового состава излучения волокна для $V=3.8$ .....	568

ВЕКШИН М.М., НИКИТИН В.А., ЯКОВЕНКО Н.А. Физико-математическое моделирование процессов формирования двухслойных волноводных структур в стекле.....	570
БЕЗПАЛЫЙ А.Д., ШАНДАРОВ В.М. Оптическое формирование волноводных элементов в ниобате лития с фоторефрактивным поверхностным слоем.....	572
ВЕКШИН М.М., ЯКОВЕНКО Н.А. Интегрально-оптический преобразователь поляризации на основе эволюции моды волновода в стекле.....	574
ВОРЗОБОВА Н.Д., СОКОЛОВ П.П., ВЕСЕЛОВ В.О. Формирование и свойства гибридных периодических структур.....	576
АНОХИНА М.А., МЕНСОВ С.Н., ПОЛУШТАЙЦЕВ Ю.В. Использование нестационарного излучения для создания 2D структур в фотополимеризующемся слое.....	578
ГАДОМСКИЙ О.Н., ЦУКАРЕВ И.А. Повышение эффективности цветных светодиодов наноструктурным композитным слоем РММА+Ag.....	580
ЧЕРНЯК М.Е., МОЖАЕВ Р.К., СТАХАРНЫЙ С.А., МЕРКУЛОВ А.В. Исследование радиационной стойкости OLED-диодов к воздействию гамма-квантов и нейтронов.....	582
САХАРОВ В.К. Многомодовый полупроводниковый лазерный гироскоп – принцип работы.....	584
КОМОЦКИЙ В.А., СОКОЛОВ Ю.М., СУЕТИН Н.В. Модулятор лазерного излучения с применением уголкового отражателя и глубокой дифракционной решетки.....	586
ШАУЛЬСКИЙ Д.В. Узел волоконно-оптической разводки многоканального лазерного генератора.....	588
КАМЕНЕВ О.Т., ПЕТРОВ Ю.С., ХИЖНЯК Р.В., КОЛЧИНСКИЙ В.А. Регистрация слабых сейсмосигналов волоконно-оптическими интерферометрическими приемниками.....	590
ГОРЯЧЕВ Л.В., МАРИНИН А.А. Дифракция света и проблема аподизации лазерных пучков.....	592
ВОРОНЦОВ Е.Н., ЕФИМОВА К.В., КОТОВА С.П., ЛОСЕВСКИЙ Н.Н., ПРОКОПОВА Д.В. Компактная установка для демонстрации спиральных пучков света.....	594
ВОЛКОВ В.Г. Псевдобинокулярные очки ночного видения для работы в области спектра 0,9–1,7 мкм.....	596
КОВАЛЕНКО С.А. Спектрометрия видимого диапазона при проведении измерений IN SITU.....	598
РАЗУВАЕВ А.Е., ШВЕДОВА О.В., ТУГАЕНКО В.Ю. Высокоэффективный фотоэлектрический приемник-преобразователь лазерного излучения для беспроводной передачи энергии.....	600

ВОЛКОВ В.Г. Подводный телевизионный монокуляр с дистанционной передачей изображения.....	602
ЕМЕЛЬЯНОВ В.М., ЛЕНТОВСКИЙ В.В., ФЕДОРОВ Д.Л. Пассивный метод измерения дальности.....	604
ВОЛОСТНИКОВ В.Г., КИШКИН С.А., КОТОВА С.П. Когерентная оптика как инструмент для решения задачи распознавания контурных изображений.....	606
БЫШЕВСКИЙ-КОНОПКО О.А., ПРОКЛОВ В.В., ЛУГОВСКОЙ А.В., КОРАБЛЕВ Е.М. Программный алгоритм линейного спектрального разделения в гиперспектральных изображениях с использованием многополосных акустооптических фильтров.....	608
ГУЛИС И.М., КУПРЕЕВ А.Г. Монохроматоры изображения на основе дисперсионной спектральной фильтрации.....	610
МАКСИМОВА Л.А., РЯБУХО П.В., МЫСИНА Н.Ю., РЯБУХО В.П. Определение субпиксельных смещений спекл-структур на основе фазового анализа их пространственных спектров.....	612
ПОЛЕТАЕВ Д.А., СОКОЛЕНКО Б.В., КОВАЛЕВА А.О., ПЕТРОВ Н.В., ШЕВКУНОВ И.А. Применение спекл-интерферометрии в археологических исследованиях.....	614
ДЁМИН В.В., ПОЛОВЦЕВ И.Г., КАМЕНЕВ Д.В., КОЗЛОВА А.С., ОЛЕНИН А.Л. Натурные испытания аппаратно-программного комплекса для изучения планктона в природных водных объектах.....	616
ГОНЧАРОВ Д.С., ПЕТРОВА Е.К., ПОНОМАРЕВ Н.М., СТАРИКОВ Р.С., ШАУЛЬСКИЙ Д.В. Синтез и исследование инвариантного корреляционного фильтра с максимальной средней высотой корреляционного пика.....	618
ДЕНИСОВ Д.Г., НАГОВИЦЫН В.В., МЕНДЕЛЕЕВ В.Я. Сравнительный анализ оптико-электронных систем дистанционного контроля параметров формы сложнопрофильных технологических изделий.....	620
АВЛАСЕВИЧ Н.Т., БУТЬ А.И., ЛЯЛИКОВ А.М. Интерферометр для измерительного контроля периодических микроструктур.....	622
ДЕНИСОВ Д.Г., ДЖУМАМУРАТОВА А.А., ЛАРИЧЕВ А.В., МАРТЫНОВА Д.А. Метод и оптико-электронное устройство контроля параметров интраокулярных линз.....	624
РЯБОВ К.Д., МЯКИНИН О.О., ГУСЕЙНОВ А.Ю., ЗАХАРОВ В.П., ХРАМОВ А.Г. Сегментация трёхмерных ОКТ снимков методом активных сфер.....	626
МЕНСОВ С.Н., ПОЛУШТАЙЦЕВ Ю.В. Использование пространственно-частотной фильтрации для повышения глубины резкости проекционных систем.....	628



БУТЬ А.И., ЛЯЛИКОВ А.М. Повышение чувствительности измерений остаточной клиновидности прозрачных подложек дифракционных оптических элементов.....	630
КОЛЮЧКИН В.В., ОДИНОКОВ С.Б. Метод косвенного измерения параметров защитных голограмм с учётом случайных искажений формы профиля микрорельефа.....	632
АУНГ М.В., РИНКЕВИЧЮС Б.С., ПАВЛОВ И.Н. Визуализация формы и деформации шероховатой поверхности с помощью структурированного оптического излучения.....	634
ГОНЧАРОВ Д.С., КРАСНОВ В.В., ПОНОМАРЕВ Н.М., СТАРИКОВ Р.С. Измерение характеристик фазовой модуляции амплитудного ЖК ПВМС двухлучевым интерферометрическим методом.....	636
БАРЫШНИКОВ Н.В., ДЕНИСОВ Д.Г., КАРАСИК В.Е., МОРОЗОВ А.Б., ПАТРИКЕЕВ В.Е., СУЛЕЙМАНОВ Г.М. Высокоточный метод измерения среднеквадратического отклонения волнового фронта лазерного излучения при контроле поверхностных неоднородностей нанометрового уровня профилей поверхностей оптических деталей.....	638
ЕВТИХИЕВ Н.Н., КРАСНОВ В.В., ШИФРИНА А.В. Методы оценки визуальной скрытности кодированных изображений в системах оптического кодирования.....	640
БАЛБЕКХИН Н.С., КУЛЯ М.С., ТУРОВ А.Т., ПЕТРОВ Н.В. Преобразование функции переноса волнового фронта для учета дисперсии в цифровой импульсной терагерцовой голографии с разрешением во времени.....	642
КУЛАКОВ М.Н., СТАРИКОВ Р.С., ЧЕРЁМХИН П.А. Применение методики «compressed sensing» в цифровой голографии.....	644
ИСМАНОВ Ю.Х., ИСМАИЛОВ Д.А., ЖУМАЛИЕВ К.М., АЛЫМКУЛОВ С.А. Эффект саморепродуцирования в голографии.....	646
КУРБАТОВА Е.А., ЧЕРЁМХИН П.А. Методы сжатия цифровых голограмм с помощью вейвлет-преобразований.....	648
КАТЕРОВА С.С., КРАСНОВ В.В., КУРБАТОВА Е.А., МОЛОДЦОВ Д.Ю., ЧЕРЁМХИН П.А., РОДИН В.Г. Разработка метода сжатия цифровых голограмм с использованием диффузии ошибки.....	650
ВОВК Т.А., ПЕТРОВ Н.В. Применение цифрового фазового сопряжения для формирования оптических волновых полей.....	652
МИНАЕВА Е.Д., КРАСНОВ В.В., ЧЕРЁМХИН П.А., РОДИН В.Г. Анализ эффективности применения метода прямого поиска со случайной траекторией для задачи минимализации ошибки синтеза киноформов.....	654
Именной указатель авторов.....	656

А.Е. КРАСНОК<sup>1,2</sup>, С.В. МАКАРОВ<sup>2</sup>, А.К. САМУСЕВ<sup>2</sup>,  
Ю.С. КИВШАРЬ<sup>2,3</sup>, П.А. БЕЛОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Техасский Университет, Остин, США*

<sup>2</sup>*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

<sup>3</sup>*Австралийский национальный университет, Канберра, Австралия*

## КРЕМНИЕВАЯ НАНОФОТОНИКА

В концепции метаматериалов совсем недавно также произошла смена парадигмы, когда в видимом диапазоне был обнаружен магнитный оптический отклик у наночастиц из диэлектриков с высоким показателем преломления. До этого подавляющее большинство структур с магнитным откликом содержало металлические элементы с высокими омическими потерями на оптических частотах, что ограничивает их работоспособность. Например, одним из хрестоматийных примеров является разомкнутый кольцевой резонатор, индуктивное металлическое кольцо с разрезом, из набора которых составлены многие метаматериалы. Однако недавно было предсказано теоретически и продемонстрировано экспериментально, что диэлектрические частицы с высоким показателем преломления могут обладать наведенными магнитными резонансами, и, в отличие от плазмонных металлических наночастиц, они почти не испытывают омических потерь ввиду отсутствия свободных зарядов. Теперь такие диэлектрические наночастицы с высоким показателем преломления используются в качестве нанорезонаторов для метаповерхностей и метаматериалов, которые позволяют эффективно управлять светом на наномасштабе без паразитных омических потерь.

А.Е. KRASNOK<sup>1,2</sup>, S.V. MAKAROV<sup>2</sup>, А.К. SAMUSEV<sup>2</sup>,  
Yu.S. KIVSHAR<sup>2,3</sup>, P.A. BELOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*University of Texas, Austin, USA*

<sup>2</sup>*ITMO University, Saint-Petersburg*

<sup>3</sup>*Australian National University, Canberra, Australia*

## SILICON NANOPHOTONICS

The concept of metamaterials recently and there was a paradigm shift when the magnetic nanoparticles have optical response of dielectrics with high refractive index has been detected in the visible range. Prior to this majority of structures with magnetic response elements comprise metallic high-ohmic losses at optical frequencies, which limits their performance. For example, a classical example is the split-ring resonator (inductive metal ring with a cut), which is a basic element for many metamaterials. However, it was theoretically predicted and experimentally demonstrated that the dielectric particles having a high refractive index may have magnetic resonances, and, in

contrast to the plasmonic metal nanoparticles, they do not experience resistive losses due to the lack of free charges. Now, such dielectric nanoparticles with a high refractive index are used as nanoresonators for metasurfaces and metamaterials that allow you to control the light effectively on the nanoscale without parasitic resistive losses.

Для эффективного управления светом на наномасштабе недавно было предложено использовать диэлектрические наночастицы с высоким значением диэлектрической проницаемости (высокоиндексных), например, наночастицы кристаллического кремния или германия [1, 2]. Было показано, что такие частицы имеют одновременно электрический и магнитный отклик, что позволяет работать с электрической и магнитной компонентами света одновременно. Кроме того, было показано, что такие частицы не испытывают сильных диссипативных потерь ввиду отсутствия свободных зарядов, что является очень привлекательным для разработки и создания функциональных нанофотонных компонент: наноантенн, метаповерхностей и метаматериалов. Более того, совсем недавно выяснилось, что такие диэлектрические наночастицы являются крайне привлекательными с точки зрения изучения их нелинейно-оптических свойств. Выяснилось, что от диэлектрических наночастиц таких материалов можно относительно эффективно генерировать оптические гармоники, а также существенно изменять их оптические свойства за счет генерации свободных носителей [3]. Также на основе метаматериалов и метаповерхностей из высокоиндексных диэлектрических наночастиц были достигнуты успехи в области создания новых оптических элементов, эффективно управляющих светом, а также в области повышения эффективности солнечных батарей.

#### *Список литературы*

1. Савельев Р.С., Макаров С.В., Краснок А.Е., Белов П.А. От оптического магнитного резонанса к диэлектрической нанофотонике (обзор). // Оптика и Спектроскопия. 2015. Т.119(4). С.548-566.
2. Jahani S., Jacob Z. All-dielectric metamaterials. // Nature Nanotechnology. 2016.V.11(1). P.23-36.
3. Makarov S., Kudryashov S., Mukhin I., Mozharov A., Milichko V., Krasnok A., Belov P. Tuning of magnetic optical response in a dielectric nanoparticle by ultrafast photoexcitation of dense electron-hole plasma. // Nano Letters. 2015. V.15(9). P.6187-6192.

О.А. РЯБУШКИН<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН*

## **КОНЦЕПЦИЯ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ФОТОНИКЕ**

В любой среде при распространении лазерного излучения часть оптической мощности преобразуется в тепло. Неоднородный разогрев среды обусловлен не только пространственным ограничением лазерного пучка, но и анизотропностью теплопроводности вещества, взаимодействующего с излучением и механизмами охлаждения. Использование термодинамического понятия температуры для математического описания среды, в которой рождается или распространяется оптическое излучение, сильно ограничивается. Понятие «эквивалентная температура», на наш взгляд, более информативно для описания физических явлений происходящих с веществом, в котором распространяется оптическое излучение.

О.А. RYABUSHKIN<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny*  
<sup>2</sup>*Fryazino branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS*

## **CONCEPTION OF THE EQUIVALENT TEMPERATURE IN PHOTONICS**

During propagation of laser radiation in any medium some part of its power is transformed into heat. Nonuniform heating is conditioned by both spatial restriction of laser beam and anisotropy of the heat conductivity, as well as by cooling mechanisms of the substance being under irradiation. In such case application of the thermodynamic temperature concept for mathematical description of the material heating has considerable limitations. In our opinion for correct characterization of physical phenomena related to interaction of laser radiation with materials it is necessary to introduce novel “equivalent temperature” concept.

В течение 50 лет, прошедших с момента появления первого лазера, наблюдается непрерывное возрастание средних и пиковых мощностей лазерного излучения. Высокие тепловые нагрузки в активных элементах твердотельных лазеров требуют тщательной оптимизации параметров резонатора и активного элемента, а также знания его реальной температуры в рабочем режиме. С другой стороны, для нелинейного преобразования частоты лазерного излучения

необходимы высококачественные нелинейно-оптические кристаллы. Несмотря на то, что такие кристаллы используются в области их прозрачности их разогрев излучением, как правило, существенно меньше, чем для лазерных кристаллов, тем не менее, они также подвержены оптическому разрушению высокими значениями мощности излучения. Нами вводится концепция эквивалентной температуры, позволяющая описать неоднородное распределение температуры внутри кристалла или стекла при его взаимодействии с лазерным излучением с помощью одного значения, напрямую связанного с частотой акустического резонанса образца в условиях взаимодействия с излучением [1-10].

В заключении необходимо отметить, что на протяжении всех последних лет (2010-2016 г.), концепцию «эквивалентная температура» совместно со мной развивали молодые коллеги: Коляшкин А.В., Мясников Д.В., Шайдуллин Р.И., Гайнов В.В., Тыртышный В.А., Вершинин О.И., Баранов А.И., Пигарев А.В., которые продолжают активно работать на кафедре фотоники МФТИ (базовая организация НТО ИРЭ-Полус)

#### *Список литературы*

1. Gainov V.V., Demyankov D.T., Ryabushkin O.A. Core temperature measurement of an active optical fiber in lasing regime. // CLEO/ Europe 2007. Summary. CJ2TUE.
2. Gainov V.V., Shaidullin R.I., Ryabushkin O.A. Steady-state heating of active fibres under optical pumping. // Quantum Electron. 2011. V.41. P.637-643.
3. Gainov V.V., Ryabushkin O.A., Vyatkin M.Yu. Interferometric technique for investigation of nonradiative transition kinetics in silica-fiber laser media. // Opt. Lett. 2015. V.40. P.5494-5497.
4. Ryabushkin O.A., Shaidullin R.I., Zaytsev I.A. Radio-frequency spectroscopy of the active fiber heating under condition of high-power lasing generation. // Opt. Lett. 2015. V.40. P.1972-1975.
5. Baranov A.I., Konyashkin A.V., Ryabushkin O.A. Self-Action of Second Harmonic Generation and Longitudinal Temperature Gradient in Nonlinear-Optical Crystals. // J. Phys.: Conference Series. 2015. V.640. 012021.
6. Ryabushkin O.A., Myasnikov D.V., Konyashkin A.V., Tyrtshnyy V.A. Equivalent temperature of nonlinear-optical crystals interacting with laser radiation. // J. of Europ. Opt. Soc. – Rapid Publications. 2011. 6. 11032.
7. Ryabushkin O.A., Konyashkin A.V., Myasnikov D.V., Tyrtshnyy V.A., Baranov A.I. Equivalent temperature of nonuniformly heated nonlinear-optical crystals in course of laser radiation frequency conversion. // Proc. SPIE. 2013. V.8847. 884711.
8. Ryabushkin O.A., Myasnikov D.V., Konyashkin A.V., Vershinin O.I. Kinetics of equivalent temperature of nonlinear-optical crystals. // CLEO®/Europe - IQEC 2013: Conference Digest. Munich, Germany, 2013. CE-P.18 TUE.
9. Ryabushkin O.A., Myasnikov D.V. Experimental determination and the theoretical model of an equivalent temperature of nonlinear-optical crystals interacting with high-power laser radiation. // Quantum Electronics. 2012. 42. 539. 9.
10. Ryabushkin O.A., Myasnikov D.V., Baranov A.I. Crystal equivalent temperature model in process of nonlinear conversion of laser radiation. // J. Phys.: Conference Series. 2014. V.510. P012031.

**В.Я. МОЛЧАНОВ, К.Б. ЮШКОВ**

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,  
Москва*

**ОБРАБОТКА СВЕРХБЫСТРЫХ ЛАЗЕРНЫХ ПОЛЕЙ  
АКУСТООПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ С ЧАСТОТАМИ  
СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА**

Рассмотрен метод формирования высокочастотных оптических тестовых сигналов для измерения переходных характеристик оптических усилителей на основе акустооптического взаимодействия chirпированных лазерных импульсов. Экспериментально продемонстрирована модуляция с временем нарастания 5 пс.

**V. Ya. MOLCHANOV, K. B. YUSHKOV**

*National university of science and technology "MISIS", Moscow*

**PROCESSING OF ULTRAFAST LASER FIELDS  
BY ACOUSTOOPTIC METHODS  
WITH SUBTERAHERTZ FREQUENCY**

We report a method of forming ultrahigh-frequency optical test signals for measurement of step response of optical amplifiers based on acousto-optic interaction of chirped laser pulses. In experiments modulation rise time of 5 ps was demonstrated.

В мощных лазерных системах для инерциального термоядерного синтеза наиболее важным принципом осуществления термоядерной реакции является пространственно-временное согласование процессов сжатия и нагрева плазмы в процессе имплозии мишени, обеспечивающих безударное сжатие мишени за счет использования профилированного во времени лазерного импульса по специальному закону. Нелинейные эффекты в активной среде усилителей и спектральная зависимость коэффициента усиления приводят к возникновению в лазерном тракте нескомпенсированных дисперсий высших порядков, искажению спектральных компонент, переходных характеристик и, соответственно, к искажениям формы мощных лазерных импульсов. Возникает необходимость в исследовании переходных характеристик оптических усилителей в рабочем режиме с пикосекундным разрешением. Близкой проблемой является формирование профилей ультракоротких мощных импульсов специальной формы с пикосекундным разрешением.

В рамках этой проблемы нами выполнена серия экспериментов по адаптивной модуляции chirпированного лазерного импульса с частотами порядка 0,1 ТГц. Теоретической основой является дисперсионный метод формирования комплексных спектральных функций [1]. Мы достигли прогресса в импульсной модуляции применением оригинальной архитектуры акустооптического (АО) дисперсионного взаимодействия протяженных в пространстве chirпированных лазерных пучков с объемной ультразвуковой решеткой в кристалле.

Ранее выполненные эксперименты с лазером на неодимовом фосфатном стекле показали возможность модуляции chirпированных лазерных импульсов в полосе порядка 5 ГГц [2]. Однако время нарастания лазерного импульса было ограничено невысоким быстродействием измерительной системы 150 пс. В следующей работе был использован титан-сапфировый лазер с шириной спектра 100 нм [3]. Для измерений переходных характеристик использована быстродействующая стрик-камера с импульсным откликом порядка 1.2 пс [4].

В эксперименте генерировались эквидистантно расположенные цуги импульсов. Спектральный диапазон 100 нм был разделен на равные интервалы с шириной 0.96 нм, каждый интервал имел амплитуду либо 0, либо 1, соответствующий произвольной бинарной последовательности.

Обнаружено, что время нарастания светового импульса практически не зависит от спектральной полосы и составляет от 4.6 пс до 5.5 пс. Этот объясняется высокой расходимостью лазерного пучка после стретчера, влияние которой на эксперимент было доминирующим. Полоса модуляции составляет 70 ГГц. Для коллимированного пучка расчетная полоса модуляции оставляет приблизительно 0,15 ТГц.

Фундаментальный вывод: время нарастания широкополосного chirпированного оптического импульса после АО-взаимодействия определяется временем пробега света через протяженную ультразвуковую решетку в кристалле, в то время как в обычных АО-приборах, работающих с монохроматическим излучением, время нарастания импульса определяется временем пробега звукового фронта через световой пучок.

#### *Список литературы*

1. Molchanov V.Ya., Yushkov K.B. // Opt. Express. 2014. V.22. P.15668.
2. Chizhikov S.I., et. al. // Laser Phys. Lett. 2013. V.10. P.015301.
3. Yushkov K.B., et al. // Opt. Lett. 2016. V.41. P.5442.
4. Щелев М.Я. // УФН. 2012. Т.182. С.649.

В.В. КРИШТОП, П.С. ГОНЧАРОВА, Е.В. ТОЛСТОВ,  
В.А. МАКСИМЕНКО, А.И. ЛИВАШВИЛИ, М.Н. ЛИТВИНОВА,  
Н.М. КИРЕЕВА, В.Г. ЕФРЕМЕНКО, А.В. СЮЙ, А.В. ПОПОВА  
*Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск*

## **ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ УПРАВЛЯЕМЫЙ СВЕТОФИЛЬТР ДЛЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

В работе представлены результаты анализа влияния взаимной ориентации поляризаторов и анизотропных кристаллов, а также внешнего электрического поля на спектр проходящего широкополосного излучения. Предлагается использовать такие системы для создания управляемых оптических фильтров и затворов.

V.V. KRISHTOP, P.S. GONCHAROVA, E.V. TOLSTOV,  
V.A. MAKSIMENKO, A.I. LIVASHVILI, M.N. LITVINOVA,  
N.M. KIREEVA, V.G. EFREMENKO, A.V. SYUY, A.V. POPOVA  
*Far Eastern State Transport University, Khabarovsk*

## **CONTROLLED INTERFERENCE FILTER FOR BROADBAND RADIATION**

Paper presents the results the analysis of the effect of mutual orientation of directions transmission polarizers and anisotropic plates, as well as the value of an external electric field. It is assumed that such systems can be used to create controlled broadband light filters and optical switchers.

Сведения об особенностях распространения излучения в анизотропных кристаллах, спектрах пропускания, поляризационных характеристиках излучения, возможности управления этими характеристиками полезны при создании новых оригинальных оптических приборов и устройств, таких как оптические светофильтры, затворы и устройства для контроля качества оптических элементов.

В работах [1, 2] рассмотрена система «поляризатор-кристалл-поляризатор». Было показано, что спектр прошедшего через систему широкополосного излучения зависит от значения величин углов  $\alpha$  и  $\beta$  и может быть периодическим, сплошным или на фоне сплошного спектра периодическим (комбинированным). При приложении к кристаллу внешнего электрического поля вдоль оптической оси происходит сдвиг периодического спектра, причем величина сдвига спектра зависит от



значения напряжения на кристалле. Благодаря быстродействию электрооптического эффекта такой фильтр может с частотой выше  $10^9$  Гц перестраивать и пропускать излучение то на одних длинах волн, то на других.

В более сложной системе «поляризатор-кристалл-кристалл-поляризатор» [3, 4] интенсивность излучения на выходе определится интерференцией четырех лучей для каждой длины волны. На практике часто используют два идентичных кристалла с взаимноперпендикулярным направлением оптических осей для компенсации термоиндуцированного двулучепреломления [5]. При направлении пропускания поляризаторов под углом  $\alpha=\beta=45^\circ$ , спектр широкополосного излучения на выходе не изменяется из-за взаимной компенсации разности фаз в двух кристаллах. При приложении к одному из кристаллов внешнего напряжения, интенсивность широкополосного излучения начинает уменьшаться. Сам вид спектра при этом не меняется. Данная конфигурация поляризаторов и кристаллов может использоваться в качестве затвора с коэффициентом контраста порядка 25 дБ.

Подбирая направления пропускания поляризаторов и плоскостей главного сечения кристаллов можно значительно изменять спектр исходного излучения. Применение же электрооптического эффекта позволяет не только преобразовывать полученные спектры, но и модулировать их по интенсивности.

#### *Список литературы*

1. Сюй А.В., Кравцова Н.А., Строганов В.И., Криштоп В.В. Ориентационная зависимость пропускания системы поляризатор-кристалл-анализатор // Оптический журнал. 2007. Т.74. №7. С.28-32.
2. Гончарова П.С., Криштоп В.В. Влияние спектральной полосы источника излучения на параметры электрооптического модулятора // Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. С.188-189.
3. Гончарова П.С., Криштоп В.В., Сюй А.В., Толстов Е.В., Пикую О.Ю. Электрооптическое управление немонахроматическим светом в системе из двух анизотропных кристаллов // НТВ СПбГУ. 2012. Т.141. №1. С.82-85.
4. Гончарова П.С., Криштоп В.В., Сюй А.В., Киреева Н.М., Пономарчук Ю.В., Ливашвили А.И., Корнеев Т.Н. Управление спектральным составом излучения в системе из нескольких анизотропных элементов // IV Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2015. С.108-109.
5. Криштоп В.В., Гончарова П.С., Киреева Н.М., Карпец Ю.М., Ефременко В.Г., Литвинова М.Н. Температурно-независимый модулятор излучения на кристалле ниобата лития // Фундаментальные исследования. 2012. №12. С.1233-1235.

А.Л. АНДРЕЕВ<sup>1</sup>, Т.Б. АНДРЕЕВА<sup>1</sup>, И.Н. КОМПАНЕЦ<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

## УСЛОВИЯ ПОЛУЧЕНИЯ БЕЗГИСТЕРЕЗИСНОЙ НЕПРЕРЫВНОЙ СЕРОЙ ШКАЛЫ В ДИСПЛЕЙНОЙ ЯЧЕЙКЕ С НЕГЕЛИКОИДАЛЬНЫМ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ЖИДКИМ КРИСТАЛЛОМ

Рассматриваются условия получения безгистерезисной, с непрерывной серой шкалой, модуляционной характеристики при переходе к максвелловскому механизму диссипации энергии в негеликоидальных сегнетоэлектрических жидких кристаллах (СЖК).

A.L. ANDREEV<sup>1</sup>, T.B. ANDREEVA<sup>1</sup>, I.N. KOMPANETS<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

## CONDITIONS OF ACHIEVING THE HYSTERESIS-FREE CONTINUOUS GRAY SCALE IN A DISPLAY CELL WITH THE HELIX-FREE FERROELECTRIC LC

Conditions are considered to provide the hysteresis-free modulation characteristic with a gray scale at the transition to maxwellian mechanism of the energy dissipation in helix-free ferroelectric LC.

В работе использовались 6 композиций негеликоидальных (бесспиральных) смектических СЖК-материалов, разработанных в ФИАН, в которых угол наклона молекул в смектических слоях  $\Theta_0$  изменялся от 21 до 23 градусов, величина спонтанной поляризации  $P_s$  – от 40 до 45 нКл/см<sup>2</sup>, а коэффициент вращательной вязкости  $\gamma_\varphi$  изменялся в гораздо больших пределах – от 0,15 до 1,5 Пуаз.

В объеме слоя всех СЖК наблюдаются пространственно-неоднородные структуры с периодическими деформациями смектических слоев, период деформации которых составляет около 2 мкм почти для всех СЖК-композиций, кроме HF-32E ( $\gamma_\varphi=1,5$  Пуаз), где он около 3,5 мкм. В таких СЖК на частотах, превышающих обратное время максвелловской релаксации, когда процесс диссипации энергии определяется уже не вращательной, а сдвиговой вязкостью, процесс переориентации директора происходит за счет движения структурно устойчивых локализованных

волн стационарного профиля – солитонов. Использование более вязких СЖК- композиций позволило значительно расширить частотный интервал существования солитонной моды, и, как следствие этого, увеличить быстродействие и повысить максимальную частоту модуляции светового излучения. Это позволило получить частоту модуляции излучения порядка нескольких килогерц и время электрооптического отклика менее 25 мкс при амплитуде управляющего напряжения  $\pm 1,5$  В [1, 2].

Изменение положения директора, а, следовательно, и главной оптической оси эллипсоида показателей преломления, вдоль каждого смектического слоя являются причиной управляемого электрическим полем двулучепреломления негеликоидальных СЖК, причем показатель двулучепреломления  $\Delta n$  зависит как от амплитуды, так и от частоты управляющего напряжения. Так для композиции *HF-32C* ( $P_S = 40$  нКл/см<sup>2</sup>,  $\gamma_\varphi = 1,0$  Пуаз) показатель двулучепреломления изменяется от 0,19 до 0,11 в диапазоне частот от 150 Гц до 6 кГц. На низких частотах (<100 Гц) и на больших частотах управляющего напряжения существует статический участок зависимости  $\Delta n(f)$ , где показатель двулучепреломления практически не изменяется. При переходе к максвелловскому механизму диссипации энергии изменяется дополнительный угол наклона директора в каждой точке смектического слоя и, соответственно положение эллипсоида показателей преломления вдоль слоя, что сопровождается уменьшением эффективного показателя СЖК.

Периодическое и непрерывное изменение положения директора вдоль смектических слоев позволяет получить практически безгистерезисную, с непрерывной серой шкалой, зависимость светопропускания электрооптической ячейки от амплитуды управляющего напряжения при увеличении и при уменьшении амплитуды в том случае, если выполнены следующие главные условия. Во-первых, частота управляющего напряжения должна соответствовать частотному интервалу существованию солитонной моды (от 100 Гц до 7 кГц для *HF-32C*). Во-вторых, эта частота не должна соответствовать статическим участкам зависимости показателя двулучепреломления СЖК от частоты управляющего напряжения. Последнее условие ограничивает существование безгистерезисной зависимости светопропускания для *HF-32C* частотой управляющего напряжения порядка пяти килогерц.

#### *Список литературы*

1. Andreev A.L., et al. // Journal of the SID. 2014. V.22. P.115-121.
2. Andreev A.L., et al. // J. of Appl. Optics. 2016. V.55. P.3483-3492.

**Н.В. СИДОРОВ, М.Н. ПАЛАТНИКОВ**

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

## **ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ВТОРИЧНАЯ СТРУКТУРА МОНОКРИСТАЛЛОВ НИОБАТА ЛИТИЯ**

Представлены результаты подробных исследований вторичной структуры, оптической и структурной однородности серий монокристаллов  $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ ,  $\text{LiNbO}_3\text{:Mg}$ ,  $\text{LiNbO}_3\text{:B}$ ,  $\text{LiNbO}_3\text{:Y}$ ,  $\text{LiNbO}_3\text{:Er}$ , характеризующихся низким эффектом фоторефракции, методами спектроскопии комбинационного рассеяния, фотоиндуцированного рассеяния света, электронной спектроскопии полнопрофильного рентгеноструктурного анализа, и лазерной коноскопии.

**N.V. SIDOROV, M.N. PALATNIKOV**

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

## **OPTICAL PROPERTIES AND SECONDARY STRUCTURE OF LITHIUM NIOBATE SINGLE CRYSTALS**

Secondary structure, optical and compound homogeneity of a series of crystals  $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ ,  $\text{LiNbO}_3\text{:Mg}$ ,  $\text{LiNbO}_3\text{:B}$ ,  $\text{LiNbO}_3\text{:Y}$ ,  $\text{LiNbO}_3\text{:Er}$  were detailed studied by Raman spectroscopy, photoinduced light scattering, electron spectroscopy, full-profile XRD, and laser conoscopy. The crystals are characterized by low photorefractive effect.

В формировании качества оптических характеристик, структурной и оптической однородности нелинейно-оптического монокристалла ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ) важную роль играет его вторичная структура. Кристалл  $\text{LiNbO}_3$  - твердый раствор  $\text{Me:Nb:LiNbO}_3$ , где Me – легирующий металл. Причем пределы растворимости многих легирующих металлов могут достигать нескольких массовых процентов. Октаэдрическая координация катионов ионами кислорода допускает значительные геометрические искажения октаэдров  $\text{LiO}_6$ ,  $\text{NbO}_6$ ,  $\text{MeO}_6$ ,  $\text{VO}_6$ , где V – вакантный октаэдр (без изменения их симметрии), что приводит к образованию кроме основной (первичной) структуры кристалла (описываемой в рамках Федоровских групп симметрии), сложных комплексов и микроструктур (кластеров), т.е. широко развитой вторичной структуры. В нестехиометрическом кристалле кластеры возникают вблизи точечных дефектов  $\text{Nb}_{\text{Li}}$ , а в легированных кристаллах, кроме того - вблизи

легирующих катионов. Состав и его структура кластера отличаются от состава и структуры кристаллической матрицы. Как правило, структура кластера обладает более низкой симметрией, чем структура основной матрицы. При этом основные (Li и Nb) и легирующие катионы в кластере оказываются в низкоэнергетических положениях, а кислородные октаэдры  $O_6$  слегка искажаются. Структура и размер кластеров зависят от состава расплава и его термической предыстории. Особенно сильное влияние легирующих металлов на вторичную структуру кристалла наблюдается в области пороговых концентраций, когда происходит изменение механизма вхождения легирующего катиона в решетку.

В работе исследована эволюция кристаллической структуры и проанализированы модели атомной структуры кристаллов  $LiNbO_3:Me$  при изменении концентрации Me в широком диапазоне концентраций. Показано, что увеличение концентрации Me приводит к скачкообразному анизотропному расширению октаэдров  $O_6$  вдоль полярной оси, сопровождающемуся изменением механизма вхождения катионов Me в структуру кристалла. Показано, что элемент В практически не входит в катионную подрешетку кристалла  $LiNbO_3$ , но определенным образом изменяет структуру расплава так, что кристаллы  $LiNbO_3:В$  характеризуется высокой структурной и оптической однородностью, низким эффектом фоторефракции. Установлено, что немонотонность в температурной зависимости интенсивностей линий спектров КРС обусловлена как наличием в структуре кластеров и микроструктур, так и особенностями проявления фоторефрактивного эффекта. Показано, что малоинтенсивные «лишние» линии в спектре КРС сильно легированных Zn и Mg кристаллов с частотами 209, 230 и  $880\text{ см}^{-1}$  могут соответствовать запрещенным в спектре псевдоскалярным колебаниям  $A_2$  типа симметрии. Их проявление в спектре возможно при существенном искажении легирующими катионами в области пороговых концентраций и выше локальной структуры кристаллов, когда в нем формируются кластеры со структурой, существенно отличающейся от структуры кристаллической матрицы и таких кластеров много. Установлено, что асимметрии спектра КРС в эквивалентных поляризационных геометриях рассеяния соответствует асимметрии центрального пятна картины ФИРС, которая возрастает с ее увеличением, т.е. с возрастанием эффекта фоторефракции в кристалле. При этом преобладающий вклад в асимметрию в КРС вносят особенности первого (центрального) слоя индикатрисы ФИРС (собственно особенности лазерного пятна), а в асимметрию индикатрисы ФИРС – третий слой.

К.М. МАМБЕТОВА, С.И. АРЕСТОВ, Л.Н. ОРЛИКОВ,  
С.М. ШАНДАРОВ, Ю.В. КУЛЕШОВ<sup>1</sup>

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
<sup>1</sup>ООО «Кристалл Т», Томск*

## **ДИНАМИКА ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ ОБРАЗЦАМИ НИОБАТА ЛИТИЯ**

Экспериментально исследована динамика электронной эмиссии, сопровождающейся генерацией рентгеновского излучения, при нагреве и при охлаждении образцов Z-среза ниобата лития в диапазоне температур от 1 °С до 100 °С, при давлении  $10^{-2}$  Торр.

K.M. MAMBETOVA, S.I. ARESTOV, L.N. ORLIKOV,  
S.M. SHANDAROV, Yu.V. KULESHOV<sup>1</sup>

*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics  
<sup>1</sup>Crystal T Ltd, Tomsk*

## **DYNAMICS OF PYROELECTRIC GENERATION OF ELECTRON BEAM BY MONOCRYSTAL SAMPLES OF LITHIUM NIOBATE**

Dynamics of electron emission that is accompanied by X-ray radiation and is observed during heating and cooling of the Z-cut lithium niobate samples has been experimentally investigated in the temperature range from 1 to 100 °C at pressure of  $10^{-2}$  Torr.

Физические явления, проявляющиеся при эмиссии электронов из сегнетоэлектрических кристаллов вследствие фотогальванического и пирозлектрического эффектов, являются предметом изучения и дискуссий до настоящего времени [1, 2]. В данном сообщении представлены результаты экспериментов по наблюдаемой в микросекундном диапазоне динамике пирозлектрической эмиссии электронов, сопровождающейся генерацией рентгеновского излучения, с использованием образцов Z-среза ниобата лития.

Нагревание и последующее охлаждение кристаллов в диапазоне температур от 1 °С до 100 °С в течение 180 с при давлении  $10^{-2}$  Торр приводило к генерации электронного пучка в пространстве между используемым образцом и расположенным на расстоянии 15 мм от него

анодом из титана с толщиной 20 мкм. Осциллограммы напряжения, создаваемого пучком на нагрузке 10 Ом, для кристалла цилиндрической формы с диаметром  $D = 13$  мм и с толщиной вдоль полярной оси  $Z$   $h = 7$  мм, представлены на рис. 1. Они демонстрируют колебания электронного тока с частотой около 0,5 МГц с малым декрементом затухания и амплитудой  $\sim 1$  мА на временном интервале с длительностью более 70 мкс. Для кристалла в виде бруска с толщиной  $h = 3,6$  мм вдоль оси  $Z$  и поперечными размерами  $10,5 \times 20,0$  мм<sup>2</sup> частота таких колебаний была близка к 1 МГц, а их амплитуда имела на порядок меньшее значение.

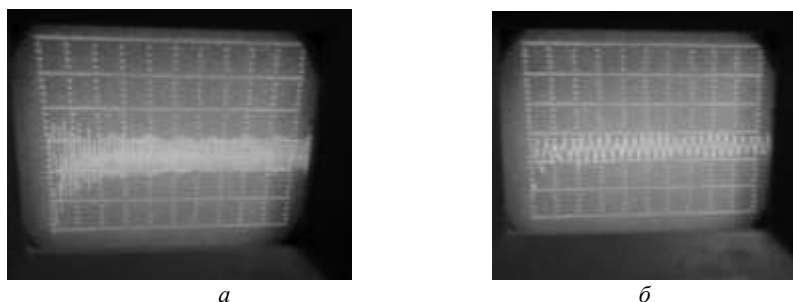


Рис. 1. Осциллограммы сигналов пирозлектрической эмиссии электронов при нагреве до температуры  $T=98$  °С (развертка 10 мкс/дел, масштаб 20 мВ/дел) (а), при охлаждении до  $T=20$  °С (развертка 5 мкс/дел, масштаб 20 мВ/дел) (б)

Оценки показали, что наблюдаемые частоты колебаний пучка близки к основной частоте продольных колебаний используемых образцов ниобата лития. Они могут возбуждаться при быстрой нейтрализации поверхностного заряда кристалла, индуцированного вследствие пирозэффекта, на начальной стадии электронной эмиссии. Суммарная доза рентгеновского излучения, генерируемого в экспериментах с образцом цилиндрической формы, была достаточной для фиксации на фотопленке.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках проектной части Госзадания на 2016 год и РФФИ (грант 16-29-14046-офи\_м).

#### *Список литературы*

1. Rosenman G.N., Shur D., Krasik Ya.A., Dunaevsky A. Electron emission from ferroelectrics. // J. Appl. Phys. 2000. V.88. P.6109-6161.
2. Ghaderi R., Davani F.A. Dynamics of pyroelectric accelerators. // Applied Physics Letters. 2015. V.106. P.042906.

Е.А. МАШКОВИЧ, С.А. СЫЧУГИН, М.И. БАКУНОВ  
*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского*

## **ПРЕОБРАЗОВАНИЕ УЛЬТРАКОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В УЗКОПОЛОСНОЕ ТЕРАГЕРЦОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ**

Теоретически показано, что ультракороткий оптический импульс может эффективно генерировать узкополосное терагерцовое излучение в кристалле ниобата лития. Нелинейное смешивание обыкновенной и необыкновенной компонент лазерного импульса накачки обеспечивает квазисинхронный режим генерации.

E.A. MASHKOVICH, S.A. SYCHUGIN, M.I. BAKUNOV  
*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod*

## **CONVERSION OF ULTRASHORT LASER PULSES INTO NARROW-BAND TERAHERTZ RADIATION IN A BULK LITHIUM NIOBATE CRYSTAL**

It is shown theoretically that an ultrashort optical pulse can efficiently generate narrow-band terahertz radiation in a bulk lithium niobate crystal. Nonlinear mixing of the ordinary and extraordinary components of the pump laser pulse provides a quasi-phase-matched regime of generation.

Оптическое выпрямление фемтосекундных лазерных импульсов высокой интенсивности в электрооптическом кристалле ниобата лития – рекордный по эффективности метод генерации широкополосного (содержащего одну-две осцилляции электрического поля) терагерцового излучения. Для ряда практических приложений, однако, необходимы источники узкополосного терагерцового излучения с высокой спектральной яркостью. Один из методов генерации такого излучения основан на оптическом выпрямлении фемтосекундного лазерного импульса в периодически-поляризованном кристалле ниобата лития (PPLN) [1]. На каждом домене PPLN-структуры лазерный импульс генерирует половину периода терагерцовой волны и в итоге, при большом числе доменов, многопериодное терагерцовое излучение. В настоящей работе предложен метод генерации многопериодного (узкополосного) терагерцового излучения фемтосекундным лазерным импульсом в неструктурированном кристалле ниобата лития. Метод основан на



нелинейном смешивании двух компонент лазерного импульса, распространяющихся в кристалле в виде обыкновенной ( $o$ ) и необыкновенной ( $e$ ) волн [2]. Наводимая при этом в кристалле низкочастотная нелинейная поляризация имеет периодическую пространственную структуру, аналогичную PPLN, что и обеспечивает узкополосность генерируемого терагерцового излучения.

Геометрия облучения кристалла показана на рис. 1: лазерный импульс (с длиной волны 1,05 мкм), поляризованный под углом  $45^\circ$  к оси  $x$ , падает по нормали на границу кристалла ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ). Оптическая ось кристалла  $z$  направлена под углом  $\theta$  к нормали. В кристалле импульс распространяется в виде суперпозиции  $o$ - и  $e$ -волн. Из-за группового разбегания пакетов  $o$ - и  $e$ -волн нелинейная поляризация  $P_x^{\text{NL}}$  локализована вблизи границы, а ее знак периодически изменяется с удалением от границы. Нелинейная поляризация возбуждает в кристалле две терагерцовые волны – одна распространяется попутно с лазерным импульсом, другая во встречном направлении. Амплитуды волн рассчитывались путем решения уравнений Максвелла с нелинейной поляризацией в качестве источника.

На рис. 2 приведена зависимость эффективности преобразования во встречную волны от длительности импульса для разных углов  $\theta$  ( $\theta$  определяет частоту возбуждаемой волны, ее значения указаны рядом с кривыми) при пиковой интенсивности накачки  $100 \text{ ГВт/см}^2$ .

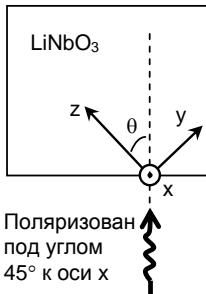


Рис. 1. Геометрия облучения кристалла

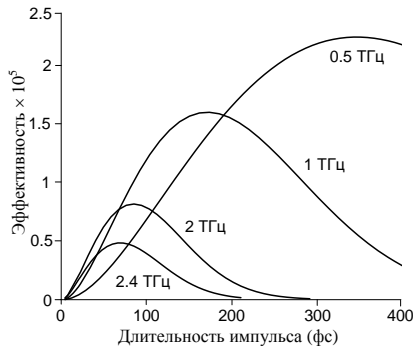


Рис. 2. Эффективность преобразования как функция длительности импульса накачки

#### Список литературы

1. Lee Y.-S., Meade T., et al., // Appl. Phys. Lett. 2000. V.76. P.2505.
2. Akiba T., Seki Y., Odagiri M., et al. // Jap. J. Appl. Phys. 2015. V.54. P.062202.

Н.Н. НАЛБАНТОВ, Е.В. СТРОГАНОВА, В.В. ГАЛУЦКИЙ  
*Кубанский государственный университет, Краснодар*

## ПОРОГОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ 1,5 мкм ЛАЗЕРНОЙ ГЕНЕРАЦИИ В ГРАДИЕНТНЫХ КРИСТАЛЛАХ $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ И $\text{LiNbO}_3:\text{Er, Yb}$

Произведен расчет порогов генерации и насыщения в градиентных кристаллах  $\text{LiNbO}_3:\text{Er, Yb}$  в сравнении с другими лазерными средами в диапазоне 1,5 мкм.

N.N. NALBANTOV, E.V. STROGANOVA, V.V. GALUTSKIY  
*Kuban State University, Krasnodar*

## THRESHOLD PARAMETERS OF 1.5 $\mu\text{m}$ LASER GENERATION IN $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ AND $\text{LiNbO}_3:\text{Er, Yb}$ NON-UNIFORMLY DOPED CRYSTALS

Calculations of lasing and saturation thresholds for non-uniformly doped crystals of  $\text{LiNbO}_3:\text{Er, Yb}$  in comparison with other 1.5  $\mu\text{m}$  laser media were conducted.

Для сравнительного анализа эффективности пороговых параметров 1,5-мкм излучения, наряду с традиционными лазерными средами, были рассмотрены кристаллы  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$  и  $\text{LiNbO}_3:\text{Yb, Er}$  с градиентными концентрационными профилями активных ионов [1-3]. Функции распределения оптических примесей соответствуют функциям (рис. 1):

$$C_{\text{Yb}}(z) = C_{1\%} \cdot (0,0205 \cdot z^3 - 0,1118 \cdot z^2 - 0,0372 \cdot z + 1,2089) \quad (1)$$

$$C_{\text{Er}}(z) = C_{1\%} \cdot (-0,0098 \cdot z^3 + 0,0511 \cdot z^2 + 0,0221 \cdot z + 0,0205) \quad (2)$$

где:  $C_{1\%}$  – концентрация примеси в кристаллической решетке  $\text{LiNbO}_3$ , соответствующая 1 % ат.

Кинетические параметры данных неоднородных кристаллов были теоретически рассчитаны с помощью физико-математической модели, представленной в [4], и использованы для расчета пороговой интенсивности накачки для 1,5 мкм лазерной генерации ( $I_{th}$ , кВт/см<sup>2</sup>), интенсивности насыщения ( $I_{sat}$ , кВт/см<sup>2</sup>) и доли возбужденных ионов эрбия ( $\beta$ ). Полученные результаты были сопоставлены с соответствующими

параметрами в других лазерных средах, используемых для генерации 1,5 мкм излучения (табл. 1).

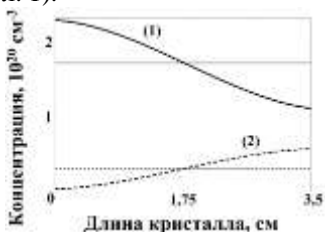


Рис. 1. Концентрационные профили ионов  $\text{Yb}^{3+}$  (сплошные линии) и  $\text{Er}^{3+}$  (пунктирные линии): (1) – концентрационный профиль ионов  $\text{Yb}^{3+}$ , соответствующий формуле (1); (2) – концентрационный профиль ионов  $\text{Er}^{3+}$ , соответствующий формуле (2); прямые линии – средние эффективные значения концентраций

Таблица 1. Спектрально-люминесцентные и лазерные параметры сред для 1,5-мкм лазеров

Параметры	Постоянная концентрация примеси Er, Yb				Градиент концентрации примеси	
	Er:LN	Yb,Er:LN	Er:F. Glass	Yb,Er:CBFB	Er:LN	Yb,Er,:LN
$I_{sat}$	14,87	17,06	11,5	20,3	14,73	25,58
$\beta \cdot I_{sat}$	2,833	3,25	5,89	4,1	2,833	4,918
$I_{th}$ (T=0,03)	3,213	0,514	0,78	0,62	3,249	0,498

Из полученных данных следует, что в градиентных кристаллах могут быть достигнуты более низкие пороги лазерной генерации одновременно с более высокими порогами оптического насыщения, что делает их более энергоэффективными по сравнению с однородными кристаллами с аналогичными средними концентрациями активных оптических примесей.

*Список литературы:*

1. Строганова Е.В., Галуцкий В.В., Судариков К.В. и др. // Автометрия. 2016. Т.52, №2. С.73-81.
2. Строганова Е.В., Галуцкий В.В., Налбантов Н.Н. и др. // Оптика и спектроскопия. 2014. Т.117. № 6. С.1012-1017.
3. Галуцкий В.В., Шмаргилов С.А., Строганова Е.В., и др. // Квантовая электроника. 2014. Т.44. №1. С.30-33.
4. Stroganova E.V., Galutskiy V.V., Yakovenko N.A. // Advanced Materials Research. 2013. V.660. P.40-46.

И.А. КАПЛУНОВ, В.В. ГЕРАСИМОВ<sup>1</sup>, А.И. КОЛЕСНИКОВ

*Тверской государственной университет*

*<sup>1</sup>Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск*

## **ОПТИЧЕСКОЕ ПРОПУСКАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ГЕРМАНИЯ В ОБЛАСТИ 40–700 см<sup>-1</sup>**

Исследовано пропускание чистых и легированных монокристаллов германия электронного и дырочного типа проводимости в среднем и дальнем инфракрасном спектральном диапазоне. Показано влияние вида и концентрации легирующей примеси на оптическое пропускание и на характер спектра.

I.A. KAPLUNOV, V.V. GERASIMOV<sup>1</sup>, A.I. KOLESNIKOV

*Tver State University*

*<sup>1</sup>Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk*

## **OPTICAL TRANSMISSION OF SINGLE CRYSTALLINE GERMANIUM IN THE REGION OF 40–700 cm<sup>-1</sup>**

The transmission of pure and doped germanium single crystals with electron and hole type of conductivity was investigated in the middle and far infrared spectral range. Characteristic is given of the effect of dopant type and concentration on the optical transmission and spectra specific features.

Основными материалами, применяемыми в дальнем инфракрасном (в том числе терагерцовом) спектральном диапазоне, являются кристаллический кварц, кремний, сапфир, ряд полимеров. Кристаллический германий из-за относительного высокого поглощения излучения в указанном диапазоне [1] не может применяться в качестве материала проходной оптики, однако представляют интерес использования германия в качестве активных элементов акустооптических устройств [2].

Эксперименты проводились в спектральном диапазоне 40-700 см<sup>-1</sup> с помощью Фурье-спектрометра (Bruker IFS 66v/s). Исследования выполнены на образцах германия, выращенных из расплава методом Чохральского в кристаллографическом направлении <111>. Исследовали монокристаллы, выращенные из нелегированного расплава, а также монокристаллы, легированные сурьмой и галлием. Образцы для исследований диаметром 39 мм и толщиной 10 мм полировались с допусками  $N < 1$ ,  $\Delta N < 0,5$ .

Спектральные зависимости легированных сурьмой монокристаллов с разной концентрацией приведены на рис. 1а. На рис. 1б представлены зависимости коэффициентов ослабления нелегированного германия, а также легированного сурьмой и галлием.

Расчет коэффициента ослабления  $\alpha$  проводился с учетом многократных отражений по известной формуле:

$$T = \frac{(1-R)^2 e^{\alpha h}}{e^{2\alpha h} - R^2},$$

где  $T$  и  $R$  - коэффициенты пропускания и отражения;  $h$  - толщина образца.

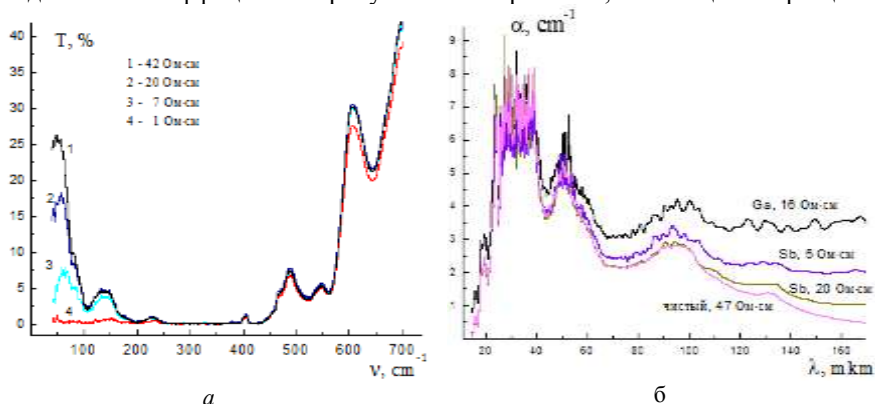


Рис. 1. Спектр пропускания германия, легированного сурьмой (а) и спектральная зависимость коэффициента ослабления чистого и легированного германия (б)

Результаты эксперимента показывают, что основное различие в спектральных зависимостях заключается в существенном росте поглощения легированных кристаллов в терагерцовом диапазоне (длина волны более  $\sim 40$  мкм). При этом наблюдается различие в монокристаллах с разным типом проводимости: кристаллы, легированные Ga имеют существенно большие значения  $\alpha$  при той же концентрации примеси в абсолютном выражении.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках реализации работ проекта по государственному заданию по научной деятельности.

#### Список литературы

1. Kaplunov I.A., Nikitin P.A., Voloshinov V.B., Kolesnikov A.I., Knyazev B.A. // IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series. 2016. V.37. 012021.
2. Волошинов В.Б., Никитин П.А., Герасимов В.В., Князев Б.А., Чопорова Ю.Ю. // Квантовая электроника. 2013. Т.43. №12. С.1139-1142.

В.Б. НОВИКОВ, А.И. МАЙДЫКОВСКИЙ, Б.И. МАНЦЫЗОВ,  
Т.В. МУРЗИНА

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

## **ЭФФЕКТ БОРМАНА В ОДНОМЕРНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ В ГЕОМЕТРИИ ЛАУЭ**

Экспериментально и теоретически исследован эффект Бормана в одномерных фотонных кристаллах с периодически модулированными коэффициентами преломления и поглощения. Эффект изучался в схеме дифракции Лауэ. Показано, что эффект Бормана принципиально отличается в фотонных кристаллах с потерями для света в слоях с высокими или низкими показателями преломления. Спектральная зависимость эффекта демонстрирует особенности, связанные с точками вырождения зонной структуры кристалла.

V.B. NOVIKOV, A.I. MAYDYKOVSKIY, B.I. MANTSYZOV,  
T.V. MURZINA

*Lomonosov Moscow State University*

## **THE BORRMANN EFFECT IN ONE-DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTALS IN THE LAUE GEOMETRY**

Investigations of the Borrmann effect in one-dimensional photonic crystals with periodically modulated refractive indexes and attenuation constants are carried out experimentally and theoretically. The studies are performed for the Laue geometry of diffraction. The Borrmann effect is shown to differ substantially for photonic crystals with light losses in high or low refractive index layers. Spectral dependence of the effect demonstrates features related with degeneracy points of the band structure of the crystals.

Эффект Бормана [1] один из основных эффектов при дифракции рентгеновского излучения с кристаллами. Он проявляется в виде аномально высокого пропускания рентгеновского излучения в условиях Брэгговской дифракции, а при отстройке угла падения от Брэгговского угла кристалл поглощает излучение. Происхождение эффекта обусловлено локализацией поля между атомными плоскостями при Брэгговской дифракции. В результате коэффициент поглощения меньше среднего по объему.

В работе проведено наблюдение оптического аналога эффекта Бормана в одномерных фотонных кристаллах. Исследования проводились

при дифракции по схеме Лауэ. В этом случае свет не испытывает ослабления, связанного с запрещенными зонами.

Экспериментальные образцы фотонных кристаллов были изготовлены из пористого кремния с последующим неполным термическим окислением. Изготовленные структуры состояли из нескольких сотен чередующихся слоев двух типов с различающимися показателями преломления и поглощения.

В эксперименте s- или p- линейно поляризованный луч лазера фокусировался на торец скола ФК, а кремниевый фотодиод примыкал к выходной грани ФК так, что прошедшее излучение, включая все дифракционные максимумы, регистрировалось как функция угла падения.

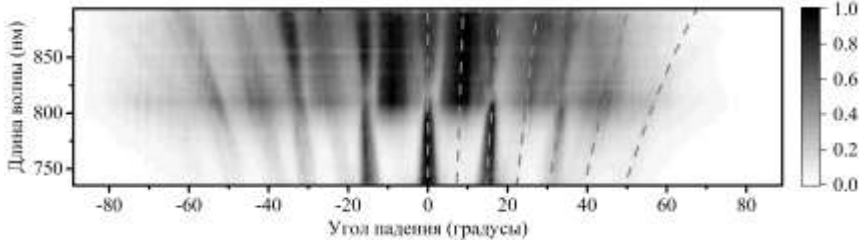


Рис. 1. Полное пропускание (отн. ед.) частично окисленного фотонного кристалла. Толщины слоев структуры  $d_1=d_2=1450$  нм. Пунктирные кривые соответствуют Брэгговским углам падения

На рис. 1 представлено полное пропускание частично окисленного фотонного кристалла в зависимости от угла падения и длины волны. Хорошо видно несколько особенностей: во-первых, максимумы пропускания соответствуют Брэгговским углам падения, во-вторых, наблюдается сужение этих максимумов в окрестности 820 нм, в-третьих, нечетные максимумы возникают при увеличении длины волны. Последние две особенности связаны с точками вырождения в зонной структуре ФК.

Пропускание же полностью окисленного фотонного кристалла демонстрирует отсутствие ярко выраженных максимумов, оно практически монотонно уменьшается при угловой отстройке от нормального падения (угол  $0^\circ$ ). Численные расчеты подтверждают существенное различие пропускания фотонных кристаллов с поглощением в слоях с высоким или низким показателем преломления.

#### Список литературы

1. Batterman B.W., Cole H.// Rev. Mod. Phys. 1964. V.36. P.681.

М.В. ЧУМАНОВ<sup>1,2</sup>, И.А. ПАРГАЧЁВ<sup>1</sup>,  
Л.Я. СЕРЕБРЕННИКОВ<sup>1,2</sup>, В.А. КРАКОВСКИЙ<sup>1,2</sup>  
ООО «Кристалл Т», Томск

<sup>1</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

## **УСТРОЙСТВА ГЕНЕРАЦИИ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ RKTP С РЕГУЛЯРНЫМИ ДОМЕННЫМИ СТРУКТУРАМИ**

Рассматривается применение кристаллов RKTP с регулярными доменными структурами (РДС) для преобразования лазерного излучения во вторую гармонику (1,064 – 0,532 мкм).

M.V. CHUMANOV<sup>1,2</sup>, I.A. PARGACHEV<sup>1</sup>,  
L.YA. SEREBRENNIKOV<sup>1,2</sup>, V.A. KRAKOVSKY<sup>1,2</sup>  
Crystal T Ltd, Tomsk

<sup>1</sup>Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

## **DEVICES FOR SECOND HARMONIC GENERATION BASED ON PERIODICALLY POLED RKTP CRYSTAL**

In this article the usage of periodically poled RKTP crystal for second harmonic generation of laser radiation (1,064 – 0,532 мкм) is presented.

Принимая во внимание тот факт, что большинство лазеров работают в режиме свободной генерации, актуальной задачей является создание устройств генерации второй гармоники на основе кристаллов с РДС, которые позволяют получить максимальную эффективность преобразования при малых плотностях мощности излучения накачки – на порядок меньше требуемых в устройствах на основе монодоменных кристаллов [1].

В качестве материала для формирования РДС использовались кристаллические пластины из высокоомного кристалла  $\text{KTiOPO}_4$  (RKTP), выращиваемого по технологии компании ООО «Кристалл Т» и обладающего рядом преимущественных особенностей, таких, как: высокие нелинейные коэффициенты; высокая лучевая стойкость и удельное электрическое сопротивление; высокая степень однородности, позволяющая изготавливать РДС с оптической апертурой до 5 мм и длиной набора решетки до 45 мм [2].



Формирование периодической доменной структуры в кристаллической среде осуществлялся приложением внешнего электрического поля вдоль кристаллографической оси  $Z$ , величина которого составила 2,2-2,3 кВ/мм. Посредством теоретического анализа и экспериментальных исследований подобран оптимальный период РДС, который на длине волны первой гармоники 1,064 мкм при температуре кристалла 59,7 °С составил 8,94 мкм. На изготовленных образцах получена зависимость эффективности преобразования во вторую гармонику от плотности мощности излучения накачки в решетке длиной 14 мм вдоль оси  $X$  (рис. 1). Эффективность преобразования достигает 50% при плотностях мощности накачки 11,5 МВт/см<sup>2</sup>, что почти в пять раз меньше по сравнению с преобразователями во вторую гармонику на основе монокристаллов.

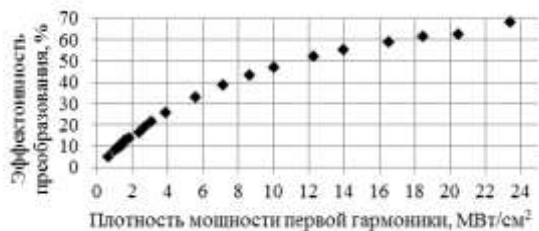


Рис. 1. Зависимость эффективности преобразования (1,064 – 0,532 мкм) от плотности мощности излучения накачки

Таким образом, показана возможность изготовления РДС в кристаллических пластинах РКТР толщиной 2 мм и более, превышая оптическую апертуру удвоителей частоты на основе кристаллов ниобата и танталата лития с РДС, где в силу технологических трудностей практически невозможно получить прямолинейные по всей толщине доменные стенки. Кроме того, оптическая прочность кристаллов РКТР с РДС достигает величины 100 МВт/см<sup>2</sup> – более чем на порядок выше лучевой стойкости ниобата и танталата лития. Полученные в работе экспериментальные данные показывают перспективность использования описанных выше удвоителей частоты с непрерывными твердотельными, полупроводниковыми и волоконными лазерами.

#### Список литературы

1. Дмитриев В.Г., Тарасов Л.В. Прикладная и нелинейная оптика. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Физматлит, 2004.
2. Чуманов М.В., Паргачев И.А. и др. // IV Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2015. С.60-61.

А.Ф. ВАЛИТОВА<sup>1</sup>, А.В. КОРЮКИН<sup>1,2</sup>, М.А. ХАМАДЕЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Казанский федеральный университет*

<sup>2</sup>*Институт перспективных исследований АН Республики Татарстан, Казань*

## **ЭКСТРАОРДИНАРНОЕ ОТРАЖЕНИЕ ГИБРИДНОГО ФОТОН-ПЛАЗМОННОГО КРИСТАЛЛА**

В работе исследуется опалоподобный фотонный кристалл, полученный методом самосборки, с нанесенной на его поверхность золотой пленкой. Приводятся спектры отражения опалоподобных гибридных фотон-плазмонных кристаллов, полученных методом самосборки. Приводится сравнение спектров гибридной структуры в зависимости от угла и наблюдается экстраординарное отражение.

A.F. VALITOVA<sup>1</sup>, A.V. KORYUKIN<sup>1,2</sup>, M.A. KHAMADEEV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Kazan Federal University*

<sup>2</sup>*Institute of Perspective Researches of Tatarstan Academy of Sciences, Kazan*

## **EXTRAORDINARY REFLECTION HYBRID PHOTONIC-PLASMONIC CRYSTAL**

In our study we investigate opal-like photonic crystal obtained by self-assembly, coated on the surface of a gold film. Are reflection spectra of opal-like hybrid photonic-plasmonic crystals obtained by self-assembly. A comparison of the spectra of the hybrid structure depending on the observed angle of extraordinary reflection is provided.

Гибридный фотон-плазмонный кристалл представляет собой кристалл, который состоит из различных комбинаций ФК в контакте с тонкопленочными плазмонными кристаллами. В этом случае наблюдаются дополнительные эффекты переноса энергии вдоль границы металл-диэлектрик [1]. При взаимодействии гибридных фотон-плазмонных кристаллов со светом можно получить необычное поглощение, а также уникальные оптические свойства в видимой и ближней инфракрасной областях из-за плазмонных эффектов [2].

Практический интерес к исследованию свойств поверхностных состояний обусловлен возможностями их применения при создании новых типов компактных лазерных устройств и оптических сенсоров, а также связан с возможностью наблюдения новых оптических эффектов, к примеру, таммовских плазмонов (ТП). Наблюдаемое явление может быть использовано для разработки новых видов резонансных оптических

фильтров, прозрачных контактов и различных поляритонных устройств [3].

В результате исследования опалоподобных гибридных фотон-плазмонных кристаллов, полученных методом самосборки, были обнаружены плазмонные моды. На спектрах отражения наблюдаются плазмонные моды [4] и экстраординарное отражение (рис. 1). Вследствие экстраординарного отражения, такой ФПК может найти применение в гигантском комбинационном рассеянии света для длин волн более 600 нм.

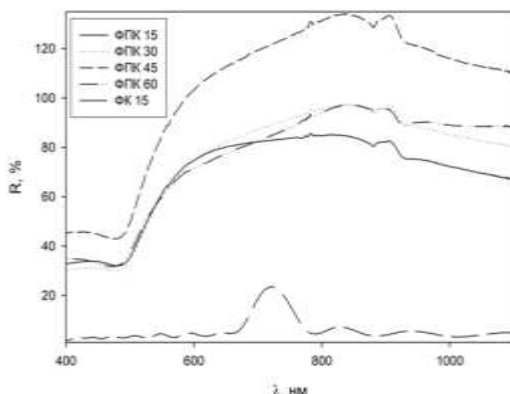


Рис. 1. Спектр отражения ФПК при разных углах и спектр ФК

#### Список литературы

1. Яников М.В., Романов С.Г., Соловьев В.Г. Изучение оптических свойств фотонных кристаллов и основ наноплазмоники в университетском курсе физики // Вестник Псковского государственного университета. 2013. Вып.2. С.205-213.
2. Akimov A.V., Meluchev A.A., Kurdyukov D.A., Scherbakov A.V., Holst A., Golubev V.G. Plasmonic effects and visible light diffraction in three-dimensional opal-metal photonic crystals // Phys. Rev. Lett. 2007. V.90. P.171108.
3. Landstrom I., Brodoceanu D., Piglmayer K., Bauerle D. Extraordinary optical transmission through metal-coated colloidal monolayers // Appl. Phys. A. 2006. V.84. P.373-377.
4. Frederich H., Wen F., Laverdant J., Coolen L., Schwob C., Maitre A. Isotropic broadband absorption by a macroscopic self-organized plasmonic crystal // Optics Express. 2011. V.19. P.24424-24433.

Р.Г. БИКБАЕВ<sup>1</sup>, П.С. ПАНКИН<sup>1</sup>, А.М. ВЬЮНЫШЕВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Сибирский федеральный университет, Красноярск*

<sup>2</sup>*Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск*

## **ОПТИЧЕСКИЕ ТАММОВСКИЕ СОСТОЯНИЯ НА ГРАНИЦЕ ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА И НАНОПОРИСТОГО СЕРЕБРА**

Исследуются оптические таммовские состояния, локализованные на краю фотонного кристалла, ограниченного пленкой нанопористого серебра. Нанопористое серебро состоит из диспергированных в металлической матрице воздушных наноразмерных пор сферической формы, и характеризуется эффективной резонансной диэлектрической проницаемостью. Впервые продемонстрирована возможность реализации двух таммовских состояний, локализованных на границе фотонный кристалл – нанопористое серебро. Изучены особенности спектрального проявления оптических таммовских состояний в зависимости от концентрации нанопор в металлической матрице и от толщины пленки нанопористого серебра.

R.G. BIKBAEV<sup>1</sup>, P.S. PANKIN<sup>1</sup>, A.M. VYUNISHEV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Siberian Federal University, Krasnoyarsk*

<sup>2</sup>*Kirensky Institute of Physics SB RAS, Krasnoyarsk*

## **THE OPTICAL TAMM STATES AT THE INTERFACE BETWEEN A PHOTONIC CRYSTAL AND NANOPOROUS SILVER**

The optical Tamm states localized at the edges of a photonic crystal bounded by a nanoporous silver film are investigated. Nanoporous silver involves spherical air nanopores dispersed in the metal matrix and is characterized by the effective resonance permittivity. Inside the band gap of the photonic crystal two transmission peaks are shown to correspond to the optical Tamm states localized at the interface between the photonic crystal and nanoporous silver. The specific features of spectral manifestation of the optical Tamm states are studied in dependence on the nanopore concentration in the metal matrix and on the nanoporous silver film thickness.

В последние годы активно исследуется особый тип поверхностных электромагнитных состояний, которые можно возбудить при нормальном падении света - оптические таммовские состояния (ОТС) [1, 2]. Такие состояния являются аналогом таммовских поверхностных состояний в физике твердого тела. ОТС может возбуждаться между двумя различными фотонными кристаллами, имеющими перекрывающиеся запрещенные

зоны [3] или между фотонным кристаллом (ФК) и средой с отрицательной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  [4].

Рассматриваемая нами ФК-структура представляет собой слоистую среду, ограниченную с одной стороны конечной нанопористой пленкой серебра (НПС) толщиной  $d_{\text{NPS}}$  состоящей из нанопор сферической формы, случайным образом распределенных в металлической матрице.

Далее будем считать, что среда, в которую помещена ФК-структура, является вакуумом. Спектр пропускания данной структуры изображен на рис. 1.

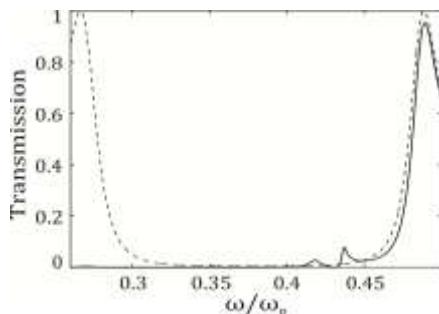


Рис. 1. Спектры пропускания исходного ФК (штриховая линия) и ФК сопряженного со слоем пористого серебра (сплошная линия), системы НПС-ФК при  $\epsilon_b = 4,16$ ,  $\epsilon_a = 1$ . Толщины слоев соответственно  $d_b = 100$  нм и  $d_a = 40$  нм.

Толщина слоя НПС  $d_{\text{NPS}} = 100$  нм, объемная концентрация нанопор  $f = 0,1$

Из рис. 1 видно, что внутри запрещенной зоны на частотах  $\omega_1 = 0,4177\omega_p$  и  $\omega_2 = 0,437\omega_p$  формируются два таммовских состояния. Величина поля, локализованного на частотах ОТС, на порядок превышает значения поля падающего излучения. Также отметим, что световое поле в ОТС локализовано в области, соизмеримой с длиной волны. Подобную модель, с двумя близкими по частоте высоколокализованными состояниями, возможно использовать для создания лазера на оптических таммовских состояниях.

Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение НИР в 2017 году (регистрационный номер заявки 3.1211.2017/ПЧ) и гранта РФФИ и Правительства Красноярского края (16-42-243065).

#### Список литературы

1. Vinogradov A.P., et. al. // Phys. Usp. 2010. V.53. P.243-256.
2. Kavokin A.V., et. al. // Appl. Phys. Lett. 2005. V.87. P.261105.
3. Kavokin A.V., Shelykh I.A., Malpuech G. // Phys. Rev. B. 2005. V.72. P.233102.
4. Vetrov S.Ya., Bikbaev R.G., Timofeev I. V. // ЖЭТФ. 2013. V.117. P.988-998.

А.А. КОЗЛОВ, С.Д. АБДУЛЛАЕВ, В.М. КАРПОВ, А.В. ИВАНОВ<sup>1</sup>

*Московский технологический университет  
(институт тонких химических технологий)*

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

## **СЕНСОРЫ ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ НА ОСНОВЕ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МИКРОСФЕР**

Приведены результаты экспериментов по созданию чувствительных к токсичным органическим растворителям систем на основе полистирольных наночастиц, упорядоченных в фотонный кристалл методом самосборки из высыхающей капли. Определены пределы обнаружения полученных систем для водных растворов и детектирования в парах.

A.A. KOZLOV, S.D. ABDULLAEV, V.M. KARPOV, A.V. IVANOV<sup>1</sup>

*Moscow Technological University (Institution of Fine Chemical Technology)*

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

## **SENSORS FOR ORGANIC SOLVENTS BASED ON PHOTONIC CRYSTALS**

Results of building sensor systems for toxic organic solvents, based on polystyrene nanoparticles, self-ordered to photonic crystals by evaporating suspension drop are presented. Detection limits for water solutions and gases are reported.

Благодаря своим специфическим оптическим свойствам, фотонные кристаллы уже находят применение в различных сферах науки и технологии. Наиболее важным для нас явилась их способность изменять свои спектральные характеристики при взаимодействии с различными веществами (растворителями, ПАВ, кислотами и др.). Благодаря этому свойству явилось возможным получить чувствительную систему, реагирующую на присутствие названных веществ. Аналитическим сигналом в таком сенсоре служит сдвиг максимумов интенсивности спектров отражения, который может быть зафиксирован даже визуально по изменению цвета фотонного кристалла.

Фотонные кристаллы получали методом самосборки из полистирольных микросфер диаметрами 170 и 230 нм в результате испарения водной суспензии с поверхности стеклянной или полимерной подложки с нанесенной фторопластовой текстурой [1]. Поверх

полученного кристалла наносили смесь полидиметилсилоксана (ПДМС) с отвердителем. После застывания получали твердую пленку ПДМС.

В результате описанного процесса образуются композиционные структуры с регулярной упаковкой и хорошо воспроизводимыми спектральными свойствами: максимумы интенсивности спектров зеркального и диффузного отражения лежат в области 520-540 и 440-450 нм для фотонных кристаллов, полученных из микросфер диаметром 230 и 170 нм соответственно.

Полученные таким образом композиционные материалы использованы нами для создания сенсоров на токсичные неполярные растворители. После нанесения на поверхность сенсора (ПДМС) аликвоты (5-20 мкл) бензола, толуола, *o*-ксилола и др. в течение 0,5-5 мин на поверхности сенсора происходит сдвиг максимума интенсивности спектров диффузного отражения в область 610-620 и 490-510 нм для кристаллов, полученных из микросфер диаметром 230 и 170 нм соответственно.

Нами предложено два возможных механизма, объясняющих происходящие в кристалле изменения. Первый заключается в том, что ПДМС сдвигает верхний слой микросфер, набухая под действием растворителя, растворитель проникает внутрь фотонного кристалла и заполняет пустоты упорядоченной упаковки. В результате этого изменяются геометрические параметры элементарной ячейки упаковки, что и приводит к спектральному сдвигу. Кроме того, при взаимодействии с неполярным растворителем полистирольные микросферы могут набухать, что также изменяет линейные параметры упаковки. (Данный механизм подтверждается наблюдаемым спектральным сдвигом при взаимодействии непокрытого матрицей фотонного кристалла с парами неполярных растворителей).

С помощью предложенных сенсоров удается визуально обнаружить  $2,8 \cdot 10^{-5}$  моль толуола,  $1,5 \cdot 10^{-3}$  М толуола в воде, а также обнаружить присутствие паров толуола при его испарении из капли в замкнутом объеме. Устойчивый сигнал наблюдался на уровне  $10^{-6}$  моль.

#### *Список литературы*

1. Козлов А.А., Абдуллаев С.Д., Грицкова И.А., Иванов А.В., Флид В.Р., Корешкова А.Н. // Тонкие химические технологии. 2015. Т.10. №6. С.58-63.

**А.А. КРАЙСКИЙ, А.В. КРАЙСКИЙ**

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

## **О ВОЗМОЖНОМ МЕХАНИЗМЕ ПОВЫШЕНИЯ ВЫХОДА НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ В КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ**

На основании аналогии уравнений, описывающих распространение светового поля по фотонному кристаллу (ФК) и частицы по кристаллу, сделан вывод об аналогии свойств волновых функций частиц в кристалле и светового поля в ФК. В спектре имеются запрещенные зоны с рядом окон прозрачности возле них. В них амплитуда волновой функции массивной частицы будет увеличиваться, что может приводить к увеличению выхода ядерных реакций с участием движущихся частиц как с частицами, имеющимися внутри кристалла, так и с ядрами ионов кристаллической решетки.

**A.A. KRAISKI, A.V. KRAISKI**

*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

## **ABOUT A POSSIBLE MECHANISM TO INCREASE THE PROBABILITY OF LOW-ENERGY NUCLEAR REACTIONS IN THE CRYSTAL STRUCTURES**

Basing on the analogy of the equations describing the propagation of the light field in the photonic crystal (PhC) and the particles in the crystal, it was concluded that properties of the wave functions of the particles in the crystal and the light field in the PhC are similar. In the spectrum, there are forbidden bands with a number of transparency windows near them. The amplitude of the wave function of solid particles increases, which may lead to an increase in the yield of nuclear reactions of moving particles with the particles inside the crystal and with nuclei of the ions of the crystal lattice.

Прямое измерение сечений ядерных реакций синтеза при низких энергиях ( $\leq 100$ кэВ) затруднено и их вычисляют с помощью экстраполяции из области высоких энергий [1-2]. В экспериментах на ускорителях с низкими энергиями ( $< 10$ кэВ) при использовании твердотельных мишеней с имплантированным в них дейтерием наблюдается значительное увеличение выхода DD-реакции по сравнению с таким расчетом [1-4]. В [1] использовалась мишень из фольги Pd, в [2] - из фольги Ti. Перед экспериментом образцы насыщались дейтерием. При энергии ионов от 10 до 25 кэВ в обоих материалах наблюдалось усиление



выхода DD-реакции, которое растет с уменьшением энергии ионов и в палладиевой мишени достигало 4. При энергии ионов 1.0 кэВ, коэффициент усиления выхода реакции составил  $10^9$  [5]. Здесь мы обращаем внимание на известный эффект усиления поля при распространении волн в периодических структурах – фотонных кристаллах (ФК) [6]. Спектр пропускания ФК имеет ряд запрещенных зон (ЗЗ) с центрами, соответствующими брэгговскому отражению. Для кристалла конечной толщины вне ЗЗ вблизи их границ при отсутствии потерь наблюдается ряд максимумов полного пропускания [6,7], называемых окнами прозрачности. Расчет дает повышение при этом интенсивности светового излучения внутри ФК до многих порядков. Это подтверждается рядом экспериментов, в частности, при генерации второй гармоники [8], спонтанном [9] и вынужденном комбинационном рассеянии света [10].

Уравнение для светового поля  $u(x)$  в одномерном ФК и волновой функции  $\psi(x)$  массивной частицы описываются выражениями

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} u(x) + \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon(x) u(x) = 0, \quad \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \psi(x) + (E - U(x)) \psi(x) = 0,$$

где  $\omega$  - частота,  $\varepsilon(x)$  - диэлектрическая проницаемость,  $m$  - масса частицы,  $U(x)$  - периодическое поле кристалла,  $E$  - энергия частицы. Как показано в работах [6, 7, 11], интенсивность светового поля в ФК в окнах прозрачности сильно повышается. Для волновой функции из (2) сшивка решений на границах будет проводиться по тем же правилам, что и в работе [11] для света в ФК, и для частицы в кристалле также могут существовать ЗЗ и окна прозрачности, где амплитуда волновой функции массивной частицы также будет увеличиваться, что может приводить к увеличению выхода ядерных реакций движущихся частиц между собой и с ядрами ионов кристаллической решетки.

#### Список литературы

1. Багуля А.В., Далькаров О.Д. и др. // Кр. сообщ. по физике ФИАН. 2012. V.39(9). P.3.
2. Багуля А.В., Далькаров О.Д. и др. // Кр. сообщ. по физике ФИАН. 2012. V.39 (12), P.3.
3. Raiola F., Migliardi P., Gyurky G., et al. // Eur. Phys. J. A. 2002. 13. 377.
4. Raiola F., Migliardi P., Gang L., et al. // Phys. Lett. B. 2002. 547. 193.
5. Bosch H. S., Halle G.M. // Nucl. Fusion. 1994. V.32. P.611.
6. Bendickson J.M., Dowling J.P., Scalora M. // Physical Review E. 1996. V.53. P.4107-4121.
7. Крайский А.А., Крайский А.В. // III Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике. Сб. научных трудов. Москва, МИФИ, 2014. С.61-62.
8. De Angelis C., Gringoli F., Midrio M., et al. // J. Opt. Soc. of Am. B. 2001. V.18. P.348.
9. Dovbeshko G., Fesenko O., Boyko V., et al. // Ukr.J.Phys. 2012. V.57(2). P.154.
10. Gorelik V.S., Kudryavtzeva A.D., Tcherniega N.V., et al. // JRLR. 2013. 34 (1). P.1.
11. Крайский А.А., Крайский А.В. // Кр. Сообщ. по физике ФИАН (послано в печать).

С.В. ДАЙНЕКО, А.Д. ХЕНДСБИ, Г.Ч. УЭЛЧ  
*Университет Калгари, Канада*

## **ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫЙ ПРОЦЕСС ПРОИЗВОДСТВА НЕ СОДЕРЖАЩИХ ФУЛЛЕРЕНА ОРГАНИЧЕСКИХ СОЛНЕЧНЫХ ЯЧЕЕК С ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ БОЛЕЕ 4.8%**

В работе сообщается об изготовлении на воздухе из негалогеновых растворителей органических солнечных ячеек с эффективностью более 4.8%, не содержащих фуллерены. Акцептор tPDI-Hex имеет высокую степень растворимости в экологических растворителях, что позволило нам использовать его для создания солнечных ячеек, содержащих стандартный донор PTB7-Th. Насколько нам известно, это самые эффективные, органические солнечные ячейки, не содержащие фуллерены, и изготовленные на воздухе с использованием негалогеновых растворителей без каких-либо добавок.

S.V. DAYNEKO, A.D. HENDSBEE, G.C. WELCH  
*Department of Chemistry, University of Calgary, Alberta, Canada*

## **GREEN SOLVENT PROCESSED FULLERENE-FREE ORGANIC SOLAR CELLS WITH EFFICIENCY OVER 4.8%**

Herein, we report a fullerene-free organic solar cell with a PCE over 4.8% fabricated with non-halogenated solvent. Our twisted PDI acceptor tPDI-Hex is highly soluble in `green` solvents which allowed us to use it to create solar cells comprising the standard donor polymer PTB7-Th. Three different solvents were employed and studied. To the best of knowledge, this is the highest performing non-fullerene organic solar cells fabricated with non-halogenated solvent without any additives in air.

На протяжении последних нескольких лет органические солнечные ячейки (OSCs) на основе объемного гетероперехода не содержащие фуллерены привлекали значительный интерес. Такие устройства обладают эффективностью преобразования энергии (PCE) около 10%. Чаще всего высокую PCE получается достигнуть, используя дорогие компоненты и токсичные галогеновые растворители для процесса изготовления, что является неблагоприятным для крупномасштабного производства. Также, высокую PCE показывают OSCs из органических материалов изготовленные с использованием сложного и дорогого синтеза, и из хлорсодержащих растворителей с обработкой высокой температурой в инертной атмосфере.

В работе были изготовлены OSCs со структурой ITO/ZnO/PTB7-Th:tPDI-Hex/MoOx/Ag, которая является простой в изготовлении и стабильна на воздухе. Пленка ZnO наносилась методом вращающейся подложки из смеси растворов 2-метоксиэтанола и этаноламина на поверхность индиевого-оловянного оксида и затем подвергалась обжигу при 200°C. Активный слой наносился сверху из раствора, содержащего полимер PTB7-Th и tPDI-Hex (рис. 1) с весовыми соотношениями 2:3 или 3:7 и общей концентрацией 10 мг/мл. Верхний электрод MoOx/Ag был нанесен методом термического осаждения в вакууме.

Вольт-амперные характеристики OSCs, измеренные под излучением солнечного симулятора со спектром AM1.5G и интенсивностью 100 мВ/см<sup>2</sup> приведены на рис. 2. OSCs, активный слой которых произведен из хлороформа, обладают PCE 5% и 4.4% с весовыми соотношениями 2:3 и 3:7, соответственно. OSCs, полученные из 2Me-THF или o-Xylene с различными весовыми соотношениями 2:3 и 3:7 показали PCE 4.7% и 4.8%, соответственно.

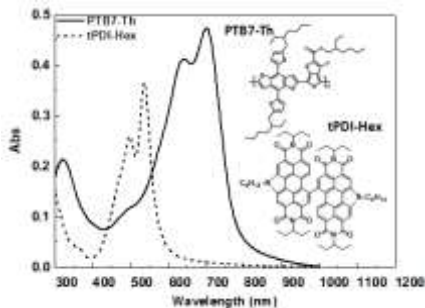


Рис. 1. Спектры поглощения и структуры донора PTB7-Th и акцептора tPDI-Hex

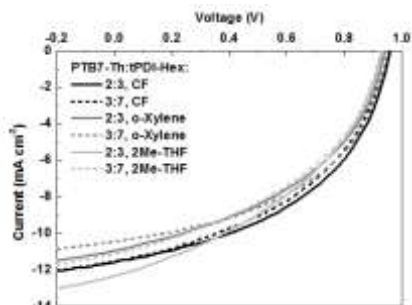


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики OSCs с PTB7-Th:tPDI-Hex

В результате, мы создали не содержащие фуллерены OSCs, произведенные из экологических растворителей при комнатной температуре на воздухе и без каких-либо добавок, которые достигают высокой PCE - 4.8%. Все изготовленные OSCs показали одинаковую производительность при замене хлороформа на негалогеновые растворители. Как известно, относительно высокой PCE обладают безфуллеренные устройства, созданные с использованием сложных и дорогих полимерных систем-доноров, таких как PTB7-Th. Поэтому для коммерциализации технологии OSCs необходимо разрабатывать простые производные полимеров, с сопоставимой производительностью.

В.Д. АНЦЫГИН<sup>1</sup>, А.А. МАМРАШЕВ<sup>1,2</sup>,  
Н.А. НИКОЛАЕВ<sup>1,2</sup>, О.И. ПОТАТУРКИН<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск*

<sup>2</sup>*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск*

<sup>3</sup>*Новосибирский государственный университет*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОИНДУЦИРОВАННОГО ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ПОЛУПРОВОДНИК-МЕТАЛЛ В ПЛЕНКАХ VO<sub>2</sub> СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

Приведены экспериментальные результаты по исследованию динамики фазового перехода в поликристаллических пленках диоксида ванадия при фотовозбуждении лазерным излучением. Показано, что Моттовский переход завершается за времена <300 фс. Вопрос о характере структурного перехода на временах <2 пс остается открытым и требует дополнительного изучения.

V.D. ANTSYGIN<sup>1</sup>, A.A. MAMRASHEV<sup>1,2</sup>,  
N.A. NIKOLAEV<sup>1,2</sup>, O.I. POTATURKIN<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk*

<sup>2</sup>*Institute of High Current Electronic SB RAS, Tomsk*

<sup>3</sup>*Novosibirsk State University*

## **INVESTIGATION OF PHOTOINDUCED SEMICONDUCTOR-METAL PHASE TRANSITION IN VO<sub>2</sub> FILMS BY SPECTROSCOPIC METHODS**

We present experimental results on the studies of phase transition dynamics in polycrystalline vanadium dioxide films after photoexcitation by laser pulses. It is shown that Mott transition ends within 300 fs. The character of the structural transition at times less than 2 ps is still an open question and requires further investigation.

Диоксид ванадия VO<sub>2</sub> интересен фазовым переходом из моноклинной полупроводящей фазы в тетрагональную (структура рутила) металлическую при нагревании до температуры 68 °С, оптической накачке или приложении электрического поля. Этот переход сопровождается значительным изменением его электрических и оптических свойств. Так, в монокристаллических пленках проводимость меняется на 5 порядков. Фазовый переход представляет собой сложный многокаскадный процесс трансформации состояний электрон-коррелированной подсистемы (рис. 1) [1] и кристаллической решетки.

После преодоления критического порога фотовозбуждения, переходный процесс разворачивается на различных временных масштабах от десятков фемтосекунд (переход полупроводник-металл) до единиц микросекунд (термализация носителей заряда и переход из моноклинной в рутильную структуру решетки) [2].

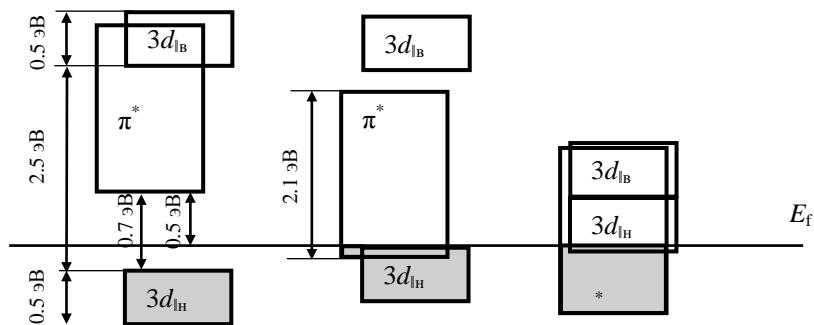


Рис. 1. Схема трансформации электронных состояний в  $\text{VO}_2$  при фазовом переходе

Объектом исследования в данной работе являлись поликристаллические пленки  $\text{VO}_2$  толщиной  $\sim 100$  нм с размером кристаллита  $\sim 50$  нм на сапфировой подложке ориентации  $\langle 0001 \rangle$ . Эксперименты выполнялись на системе терагерцовой нестационарной спектроскопии, обеспечивающей предварительное возбуждение образца и регистрацию его отклика на оптических и терагерцовых частотах.

При нагревании  $\text{VO}_2$  из-за заброса фотовозбужденных электронов из  $3d_H$  в  $\pi^*$ -зону происходит экранирование кулоновского потенциала и уменьшение корреляционного взаимодействия, что приводит к уменьшению ширины запрещенной зоны и ее схлопыванию при превышении интенсивности накачки  $\sim 10$  мДж/см<sup>2</sup>. За время  $< 300$  фс происходит только Моттовский переход в металлическое состояние. Последующий Пайерлсовский структурный переход, сопровождающийся разрушением димеров ванадия на временах  $< 2$  пс, требует дополнительного изучения и экспериментального подтверждения.

#### Список литературы

1. Ильинский А.В., Шадрин Е.Б., Квашенкина О.Е. // Физика и техника полупроводников. 2012. Т.46, №4. С.439-446.
2. Wegkamp D., Stähler J. // Progress in Surface Science. 2015. V.90. №4. P.464-502.

В.С. БЕЗРУЧЕНКО<sup>1,2</sup>, В.В. МОГИЛЬНЫЙ<sup>1</sup>, А.И. СТАНКЕВИЧ<sup>1</sup>,  
Ал.Ан. МУРАВСКИЙ<sup>2</sup>, Ан.Ал. МУРАВСКИЙ<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск  
<sup>2</sup>Институт химии новых материалов НАН Беларуси, Минск

## ГРАДИЕНТНЫЕ ОРИЕНТИРУЮЩИЕ СЛОИ ДЛЯ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЛИНЗ

Созданы слои на основе фотосшиваемых полимеров, обеспечивающие ориентацию жидких кристаллов с произвольным заданным распределением угла преднаклона в ЖК ячейке. Модификация первоначально гомеотропной ориентации осуществляется неполяризованным ультрафиолетовым облучением натертого полимера или облучением полимера линейно-поляризованным светом без натирания. Разработан способ оптического формирования аксиально-симметричного распределения угла преднаклона и созданы образцы управляемых ЖК микролинз.

V.S. BEZRUCHENKO<sup>1,2</sup>, U.V. MAHILNY<sup>1</sup>, A.I. STANKEVICH<sup>1</sup>,  
Al.An. MURAVSKY<sup>2</sup>, An.Al. MURAUSKI<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Belarusian State University, Minsk  
<sup>2</sup>Institute of Chemistry of New Materials, NAS Belarus, Minsk

## GRADIENT ALIGNING LAYERS FOR LIQUID CRYSTAL LENSES

On the basis of photocrosslinking polymers the alignment layers for liquid crystal creating any desired distribution of pretilt angle in LC cell have been developed. Local modification of primary homeotropic alignment can be accomplished by nonpolarized ultraviolet irradiation of the rubbed polymeric layer or by irradiation of the nonrubbed layer with linearly polarized light. Optical formation technique of required axially symmetric distribution of pretilt angle magnitudes is proposed and the samples of tunable LC microlenses are created.

Для создания необходимого распределения показателя преломления в структуре ЖК линзы используют разнообразные приемы, один из которых заключается в постепенном уменьшении угла наклона директора по мере удаления от оси линзы [1]. Для создания такого эффекта необходима возможность локального технологического воздействия на ориентирующий слой, ведущего к изменению соотношения между энергиями ЖК молекул в гомеотропной и планарной ориентациях. Нарастание азимутальной энергии сцепления происходит в процессе

создания фотоориентации под действием линейно-поляризованного света и фотостимулированной ориентации после натирания, когда энергия сцепления растет при облучении неполяризованным светом. Оба явления характерны для полимеров, содержащих в боковой цепи фоточувствительные бензальдегидные группы, например, серий В и М [2]. Максимальный угол преднаклона, однако, для этих полимеров не превышает 0,5 градуса. С целью получения первоначальной гомеотропной ориентации бензальдегидные полимеры были нами модифицированы введением углеводородных боковых заместителей достаточной длины. Созданные серии градиентных ориентирующих материалов BL и ML позволяют получать из растворов с помощью центрифугирования полимерные слои, обеспечивающие гомеотропную ориентацию ЖК при небольших дозах УФ облучения. Натирание слоя и последующее неполяризованное УФ облучение, а также облучение линейно-поляризованным светом без натирания, приводят к уменьшению угла преднаклона до нулевых значений (рис. 1).

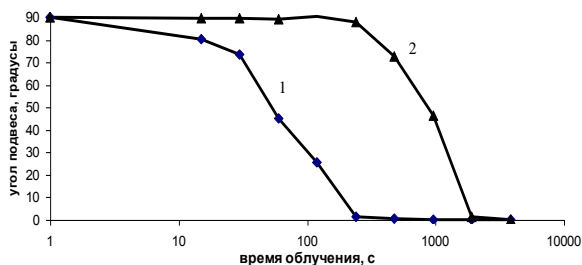


Рис. 1. Зависимость угла подвеса от времени облучения для градиентных фоточувствительных материалов серии BL (1) и ML (2)

Облучением через фотомаску с круглым отверстием удастся создать необходимое осесимметричное распределение задаваемых ориентантом углов преднаклона в пределах 90-0 градусов при оптимальном расстоянии между маской и экспонируемым слоем. Собранные ЖК ячейки с постоянным зазором, гомеотропной ориентацией на одной подложке и колоколообразным распределением углов преднаклона на другой демонстрируют свойства линзы для линейно-поляризованного света. Подача электрического напряжения увеличивает ее фокусное расстояние.

#### Список литературы

1. Bezruchenko V.S., et al. // Molecular Crystals and Liquid Crystals. 2016. V.626. №1. P.222-228.
2. Mahilny U.V., et al. // Physics Procedia. 2015. V.73. P.121-125.

Б.И. ШАПИРО, А.Д. НЕКРАСОВ, Е.В. МАНУЛИК

*Московский технологический университет  
(институт тонких химических технологий)*

## **МЕТАЛЛОКОМПЛЕКСНЫЕ J-АГРЕГАТЫ ПОЛИМЕТИНОВЫХ КРАСИТЕЛЕЙ КАК ФОТОСЕНСОРЫ В ОРГАНИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ**

Разработан процесс управляемой кристаллизации J-агрегатов анионных полиметиновых красителей под действием многозарядных катионов металлов. Синтезированные кристаллы J-агрегатов металлокомплексов полиметиновых красителей обладают экситонным характером поглощения и высокой фотопроводимостью.

B.I. SHAPIRO, A.D. NEKRASOV, E.V. MANULIK

*Moscow Technological University (Institution of Fine Chemical Technology)*

## **METALLOCOMPLEXIS J-AGGREGATES POLYMETHINE DYES AS PHOTOSENSORS IN ORGANIC ELECTRONICS**

Developed a process of controlled crystallization of J-aggregates anionic polymethine dyes under the influence of multiply charged metal cations. The synthesized crystals of metallocomplexis J-aggregates of polymethine dyes have absorption exciton character and high photoconductivity.

Одним из перспективных направлений в развитии электроники и фотоники, несомненно, является «органическая электроника». В настоящее время при широком развитии оптических методов записи, обработки и воспроизведения информации в рамках нанотехнологий особое значение приобретают высокоупорядоченные молекулярные агрегаты и кристаллы из полиметиновых красителей. В частности, речь идет о разработке методов управляемого формирования молекулярных ансамблей определенного строения с заданными оптическими и электронными свойствами, которые могут представлять интерес в системах оптического преобразования информации [1]. Агрегаты полиметиновых красителей, как потенциальные светочувствительные элементы для оптоноаноэлектроники, вызывают особенно значительный интерес. Интенсивное поглощение света и высокий квантовый выход генерации носителей зарядов (экситонов Френкеля) в них при действии



света делает их перспективными в качестве фотоприемников излучения, химических индикаторов и фотовольтаических преобразователей [1, 2].

Агрегаты красителей представляют собой нековалентно связанные органические полупроводники со строго организованной структурой полимера [1, 2]. На основании изучения равновесия между димерами и J-агрегатами для анионных трицианиновых красителей был предложен новый “блочный” механизм формирования агрегатов из димеров [2]. Существенное влияние на агрегацию анионных красителей оказывают катионы металлов [2]. Разработан процесс управляемой кристаллизации J-агрегатов анионных красителей под действием многозарядных катионов металлов, фоточувствительных в диапазоне от 450 до 790 нм. Показано, что в металлокомплексных J-агрегатах полиметиновых красителей в полной мере сохраняются экситонные свойства молекулярных кристаллов органических полупроводников, благодаря которым в слоях J-агрегатов в экситонных полосах поглощения наблюдается фотоотклик с квантовой эффективностью преобразования света от 2 до 8 % при отношении фототока к темновому току  $\sim 10^2$ . Полученные металлокомплексные агрегаты обладают повышенной фото- и термостабильностью. Благодаря высокому коэффициенту экстинкции ( $\sim 10^5$  л·моль<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup>) слой металлокомплексного красителя толщиной порядка от 30 до 50 нм практически полностью поглощает падающий свет. В работах [3,4] рассмотрен матричный синтез наноразмерных мультислойных агрегатов полиметиновых красителей. Показано, что J-агрегаты анионных красителей стимулируют рост на них агрегатов катионных красителей.

Сделан вывод, что синтез высокоорганизованных многослойных структур агрегатов красителей перспективен для формирования элементов наноразмерных устройств для обработки оптической информации. Матричный синтез открывает путь к технологии «самосборки» наносхем для фотоэлектроники и оптроники.

#### *Список литературы*

1. Шапиро Б.И. // Успехи химии. 2006. Т.75. №5. С.484.
2. Шапиро Б.И. // Российские нанотехнологии. 2008. Т.3. №3-4. С.72.
3. Шапиро Б.И., Саталкина Е.А., Некрасов А.Д. // Российские нанотехнологии. 2014. Т.9. № 7-8. С. 8.
4. Шапиро Б.И., Манулик Е.В. // Российские нанотехнологии. 2016. Т.11. № 5-6. С.14.

Г.Е. АДАМОВ, Е.П. ГРЕБЕННИКОВ,  
Н.О. ПОРОШИН, П.С. ШМЕЛИН  
*АО «ЦНИТИ «ТЕХНОМАШ» Москва*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАНОЧАСТИЦ СИЛИКАТА СЕРЕБРА НА ФОТООТКЛИК БАКТЕРИОРОДОПСИНА**

Исследовано взаимодействие наночастиц Ag/SiO<sub>2</sub> с бактериородопсином (БР). Показано существенное изменение временных параметров фотоцикла БР под влиянием наночастиц, приводящее к преобладанию состояния интермедиата P490 над основным. Возможными объяснениями являются как изменение энергетических уровней БР в образующейся гибридной наноструктуре, так и наличие плазмонного резонанса у наночастиц Ag/SiO<sub>2</sub>.

G.E. ADAMOV, E.P. GREBENNIKOV,  
N.O. POROSHIN, P.S. SHMELIN  
*JSC «CSRIT «Technomash», Moscow*

## **INFLUENCE NANOPARTICLES Ag/SiO<sub>2</sub> ON BR PHOTOCYCLE**

Presents the results of research interactions between nanoparticles Ag/SiO<sub>2</sub> and bacteriorhodopsin (BR). Presence of nanoparticles causes to a significant change in temporal parameters of BR photocycle: intermediate P490 begin to prevail over ground state BR570. This can be explained by forming of hybrid nanostructure and by appearance of plasmon resonance at nanoparticles Ag/SiO<sub>2</sub>.

Новые гибридные бионаноструктуры со светочувствительными и нелинейными свойствами могут иметь многочисленные варианты применения, использующие их фотохромные свойства, способности к переносу и преобразованию энергии.

Целью данного исследования было изучение влияния наночастиц силиката серебра (~40 нм) на фотохимические свойства бактериородопсина в составе пурпурных мембран.

Стенд для исследования состоял из галогенового источника тестирующего излучения, лазера с  $\lambda=532$  нм и спектрофотометра S150-2-1024USB. Тестирующее излучение от источника проходило через кювету с раствором и фокусировалось на оптоволокне спектрофотометра.

На рис. 1 показаны изменения оптической плотности во времени для бактериородопсина и структур, образованных бактериородопсином и наночастицами силиката серебра на длинах волн 412, 470 и 570 нм.

Вклад интермедиатов в экспериментальные спектры (пример на рис. 2) определялся путем аппроксимации экспериментальных спектров методом наименьших квадратов. Теоретическая кривая состояла из суммы вкладов интермедиатов и фона. Зависимости коэффициентов экстинкции интермедиатов от длины волны были взяты из работы [1]. В результате анализа, были определены интермедиаты с наибольшей динамикой концентраций – это сам БР и его интермедиаты М, Р и Q.

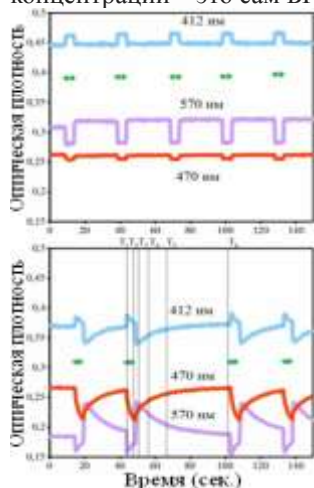


Рис. 1. Изменения оптической плотности растворов

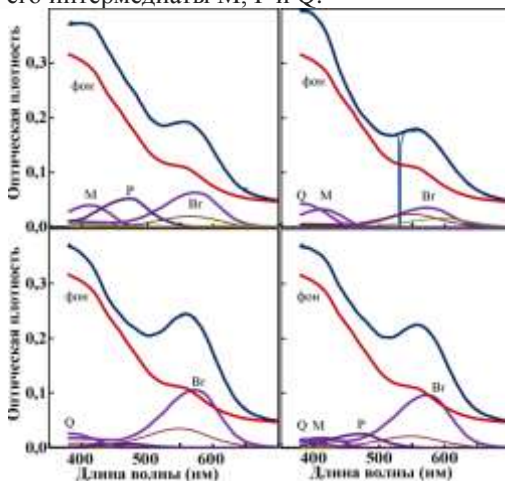


Рис. 2. Результат аппроксимации экспериментальных спектров

Возможными объяснениями наблюдаемых изменений в фотоцикле бактериородопсина в присутствии наночастиц силиката серебра могут быть как изменение энергетических уровней БР в образующейся гибридной наноструктуре, так и наличие условий для плазмонного резонанса у наночастиц Ag/SiO<sub>2</sub> (в т.ч. в присутствии БР). Все это приводит к изменению (увеличению) темнового времени релаксации интермедиатов (в частности М и Р) и увеличению квантового выхода реакции фотопревращения. Для дальнейшего понимания механизма будет проведено количественное исследование динамики интермедиатов.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 14-03-00479).

#### Список литературы

1. Friedrich C., Lueking D., Griep M. Bacteriorhodopsin-based sensors. US Patent 8,551,407 B2, 2009.

М.А. ГОРЯЕВ

*Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена,  
Санкт-Петербург*

## **СЕНСИБИЛИЗИРОВАННЫЙ КРАСИТЕЛЯМИ ФОТОЭФФЕКТ В КРЕМНИИ**

Исследована фотопроводимость на постоянном токе порошкообразного кремния и конденсаторная фото-ЭДС монокристаллов кремния. Показано, что органические красители на поверхности полупроводника эффективно увеличивает внутренний фотоэффект в полосе поглощения красителей.

М.А. GORYAEV

*The A.I. Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint-Petersburg*

## **DYE SENSITIZED PHOTOEFFECT IN SILICON**

The direct current photoconductivity of the powdered silicon and photovoltaic effect in monocrystalline silicon are investigated. There is shown organic dyes on the semiconductor surface effectively increase internal photoeffect in the dye absorption band.

Спектральная сенсбилизация фотоэффекта красителями хорошо известна для ряда широкозонных ( $E_g > 2,5$  эВ) полупроводников и находит применение в классической фотографии на основе AgHal [1-3] и в солнечных ячейках на  $TiO_2$  [4]. Основным недостатком солнечных элементов на базе кремния является относительно невысокий коэффициент поглощения в области непрямых переходов, поэтому толщина таких фотоэлектрических преобразователей должна составлять сотни микрон [5]. В настоящей работе исследованы фотопроводимость порошкообразного кремния на постоянном токе [6-8] и конденсаторная фото-ЭДС монокристаллов кремния и влияние на фотоэффект красителей на поверхности полупроводника.

Фотопроводимость окрашенных порошкообразных образцов в области поглощения красителей более чем на порядок выше фотопроводимости неокрашенного кремния. Увеличение эффективности генерации свободных носителей при передаче энергии от красителя по сравнению с поглощением в собственной области полупроводника обусловлено тем, что это поглощение формируется непрямые электронными переходами.

В спектре конденсаторной фото-ЭДС монокристаллического кремния также наблюдается сенсбилизация фотоэффекта окрашенных образцов в области поглощения красителя. Величина сенсбилизированного фотоэффекта в монокристаллах существенно меньше, чем в порошкообразных образцах. Это связано с тем, что удельная поверхность мелкодисперсных порошков на несколько порядков больше, чем у монокристалла. Увеличение фотоэффекта при поглощении красителем происходит из-за того, что вследствие небольшого коэффициента экстинкции кремния поглощение и генерация носителей при собственном поглощении происходит на относительно большой глубине кристалла. Эффективный радиус переноса энергии при сенсбилизации красителями составляет несколько нанометров [9], поэтому возрастает роль приповерхностной генерации фотоэлектронов и это проявляется на фоне объемной генерации носителей за счет собственного поглощения полупроводника.

На монокристаллах при увеличении концентрации красителя наблюдается сначала рост, а затем падение фотоэффекта в области поглощения красителя. Оптимальная для сенсбилизации концентрация молекул красителя на поверхности монокристалла составляет величину  $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . С учетом того, что площадь молекул красителя составляет величину  $0.7\text{-}1.5 \text{ нм}^2$  [1], это соответствует толщине пленки красителя около 30 монослоёв или 10-15 нм. Поскольку эффективный радиус переноса энергии при сенсбилизации красителями составляет 5-7 нм [9], то часть поглощенной красителем энергии не доходит до полупроводника.

Обнаруженная сенсбилизация красителями внутреннего фотоэффекта в кремнии может быть использована в полупроводниковых устройствах преобразования световой энергии в электрическую таких, как солнечные батареи [5] или ПЗС-матрицы, применяемые в качестве приемников изображения в современных системах электронной фотографии [10].

#### *Список литературы*

1. Джеймс Т.Х. Теория фотогр. процесса. Л.: Химия, 1980.
2. Акимов И.А., Горяев М.А. // Ж. физ. хим. 1984. Т.58. №5. С.1104.
3. Горяев М.А. Физ. осн. фотохимии тв. тела. Saarbrucken: Lambert Acad. Publ. 2013.
4. Gratzel M.J. // Photochem. Photobiol.C: Photochem.Rev. 2003. V.4. №2. P.145.
5. Афанасьев В.П. и др. Тонкопленочные солнечные элем. на основе кремния. СПб, 2011.
6. Горяев М.А. // Ж. физ. хим. 2015. Т.89. №12. С.1940.
7. Горяев М.А. // Сб. тр. V межд. конф. по фот. и инф. опт. М.: НИЯУ МИФИ, 2016. С.295.
8. Горяев М.А. // Труды XIII межд. конф. АПЭП-2016. Новосибирск: НГТУ, 2016. С.24-26.
9. Акимов И.А. и др. Сенсбилизированный фотоэффект. М.: Наука, 1980.
10. Горяев М.А., Дудников Ю.А. // ЖНиПФиК. 1990. Т.35. №5. С.386.

И.С. ПИЧУГИН, А.И. ИГНАТЬЕВ  
*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **ХЛОРИДНЫЕ ФОТОТЕРМОРЕФРАКТИВНЫЕ СТЕКЛА**

Представлены результаты исследования влияния концентрации NaCl на спектральные и оптические свойства фототермоорефрактивных стекол и стеклокерамик на их основе. Получены зависимости положения пика плазмонного резонанса и изменение показателя преломления после УФ облучения и термообработки от концентрации NaCl.

I.S. PICHUGIN, A.I. IGNATIEV  
*ITMO University, Saint-Petersburg*

## **CLORINE PHOTO-THERMO-REFRACTIVE GLASS**

Presents the result of influence of bromine concentration on the spectral and optical properties of photo-thermo-refractive glasses and glass-ceramics based on them. The dependence of the position of the plasmon resonance peak and refractive index change after UV irradiation and heat treatment on the concentration of NaCl have been studied.

Фототермоорефрактивные (ФТР) стекла являются перспективным материалом для записи объемных амплитудно-фазовых голограмм [1]. Голограммы на ФТР стекле обладают высокой дифракционной эффективностью, долгим сроком хранения, высокой химической, механической и термической прочностью. В состав ФТР стекла входят фоточувствительная добавка  $\text{CeO}_2$ , акцепторы электронов  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  и  $\text{Ag}_2\text{O}$ , а также ионы  $\text{F}^-$  и  $\text{Br}^-$ , участвующие в процессе фототермоиндуцированной (ФТИ) кристаллизации (рис. 1).

Бром в ФТР стекле играет огромную роль в процессе ФТИ кристаллизации [2], и влияет на его спектральные и оптические свойства [3-5]. Однако не проводились исследования ФТР стекол, в состав которых вместо ионов брома вводились ионы хлора.

В работе были синтезированы и исследованы ФТР стекла натриевоцинкоалюмосиликатные системы ( $\text{Na}_2\text{O-ZnO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-NaF-NaCl}$ ), содержащие в составе  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  и  $\text{Ag}_2\text{O}$ , с переменной концентрацией NaCl от 0 до 3,15 мол.%. Стекла синтезировались в воздушной атмосфере при температуре 1450°C в кварцевых тиглях. Мешка осуществлялась платиновой мешалкой. Температура стеклования определялась методом дифференциальной сканирующей калориметрии

(ДСК). Полученные образцы облучались УФ излучением ртутной лампы и обрабатывались в градиентной печи при температурах от 400°C до 540°C. Спектры поглощения измерялись на спектрофотометре Lambda 650. Показатели преломления измерялись на рефрактометре Аббе ИРФ-454.

В работе показано:

- введение хлора в ФТР стекло не влияет на положение полосы  $Ce^{3+}$ .
- при введении хлора в ФТР стекло после термообработки меняется его показатель преломления в УФ облученной и необлученной областях.
- положение пика плазмонного резонанса наночастиц серебра меняется в зависимости от концентрации хлора и времени термообработки.
- в стеклах с концентрацией хлора меньше 1 мол.% не наблюдается роста кристаллической фазы NaF.
- изменение прироста показателя преломления ( $\Delta n$ ) для стекол с разной концентрацией хлора.

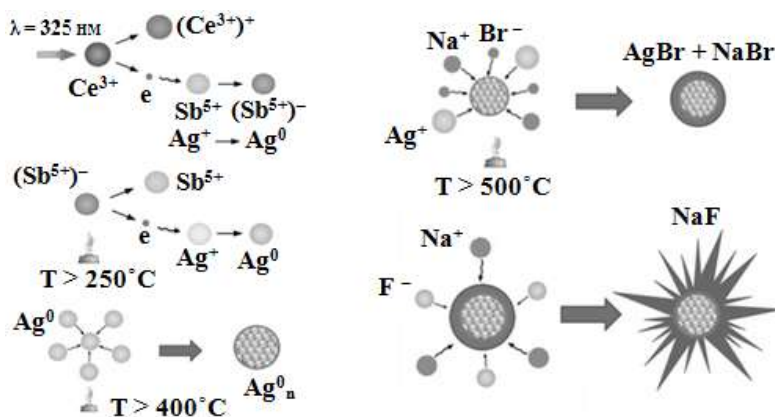


Рис. 1. Процесс фототермоиндуцированной кристаллизации

#### Список литературы

1. Кучинский С.А., Никоноров Н.В., Панышева Е.И., Савин В.В., Туниманова И.В. // Оптика и спектроскопия. 1991. Т.70. №6. С.1296.
2. Иванов С.А., Игнатьев А.И., Никоноров Н.В., Асеев В.А. // Оптический журнал. 2014. Т.81. №6. С.72-77.
3. Glebova L., Lumeau J., Klimov M., Zanutto E.D., Glebov L.B. // Journal of Non-Crystalline Solids. 2008. V.354. P.456-461.
4. Лазарева К.Е., Акишина Е.Ю. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2008. Т.51. С.245-250.
5. Лазарева К.Е., Акишина Е.Ю., Никоноров Н.В., Сидоров А.И., Цехомский В.А. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2009. Т.60. С.5-16.

А.Б. БЫЧКОВ, А.С. КОЖИНА, А.А. МИТЮРЕВА,  
А.Г. РЕЗИКЯН, В.В. СМИРНОВ  
*Санкт-Петербургский государственный университет*

## **ДИНАМИКА ФОТОИОНИЗАЦИИ АТОМА ЛИТИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ МОЩНОГО УЛЬТРАКОРОТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

На основе разработанного траекторного метода рассчитана вероятность процесса фотоионизации атома лития под действием ультракороткого рентгеновского излучения в широком диапазоне интенсивности поля. Приводятся зависимости вероятности фотоионизации от интенсивности излучения и от времени при интенсивности релятивистской величины.

A.B. BICHKOV, A.S. KOZHINA, A.A. MITYUREVA,  
A.G. REZIKYAN, V.V. SMIRNOV  
*Saint-Petersburg State University*

## **DYNAMICS OF PHOTOIONIZATION OF LITHIUM ATOM UNDER THE EXPOSE OF STRONG, ULTRASHORT X-RAY RADIATION**

The probability of the process of photoionization of lithium atom under the expose of ultrashort X-ray radiation in a wide range of field intensity was calculated on the base of the developed trajectory method. The dependences of the probability of photoionization on the radiation intensity and on time for the field strength of the relativistic intensity are represented.

Рассмотрен процесс фотоионизации атома лития под действием рентгеновского излучения. Вероятность фотоионизации найдена на основе разработанного нами траекторного метода [1-4], который позволяет вычислять вероятности фотоионизации атомов в широком диапазоне параметров поля излучения, в том числе для ультракоротких, мощных рентгеновских импульсов релятивистской интенсивности.

Некоторые результаты расчетов представлены на рис. 1 и 2. Все величины приводятся в атомной системе единиц. Рис. 1 дает зависимость вероятности фотоионизации атома лития от величины поля излучения, а рис. 2 от времени. Линии 1 - 4 соответствуют полной, одно- двух- и трехкратной ионизации. В качестве величины поля излучения используется безразмерный параметр Фейсала  $\chi = \alpha e A / E_a$ , где  $\alpha$  –



постоянная тонкой структуры,  $A$  – амплитуда колебаний векторного потенциала, и  $E_a = e^2/a_0$  – энергия атомного масштаба. При  $\omega\tau \gg 1$  имеем  $\chi \sim 1/\gamma$ , где  $\gamma$  адиабатический параметр Келдыша. В представленных расчетах частота поля излучения  $\omega = 30$  ( $\sim 0.8$  KeV), длительность импульса  $\tau = 30$  ( $\sim 0.8$  fs). Зависимость от времени приводится для величины поля излучения  $\chi = 7.3$ , которой соответствует релятивистская величина интенсивности с плотностью потока энергии  $\sim 10^{22}$  W/cm<sup>2</sup>. Зависимость вероятности фотоионизации атома лития от интенсивности излучения похожа на зависимость для атома гелия, полученную нами [1] и в работе [5], и показывает проявление так называемого "эффекта стабилизации" в сильном лазерном поле в случае многоэлектронной системы.

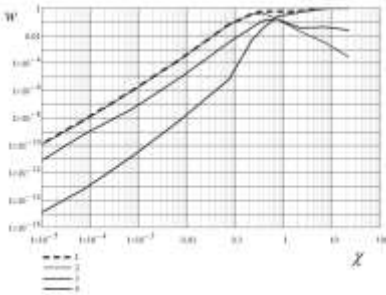


Рис. 1. Зависимость вероятности фотоионизации атома лития от величины поля излучения

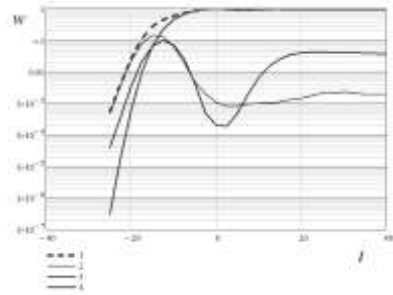


Рис. 2. Зависимость вероятности фотоионизации атома лития от времени

Полученные результаты могут представлять интерес для анализа влияния деградации объекта под действием мощного ультракороткого импульса рентгеновского лазера на восстановление образа объекта с атомным разрешением из дифракционной картины [6, 7].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (Проект № 16-32-50196).

#### Список литературы

1. Bichkov A.B., Kozhina A.S., Smirnov V.V. // Phys. Lett. A 2016. V.380. P.1263-1266.
2. Bichkov A.B., Smirnov V.V. // Eur. Phys. J. D. 2015. V.69. Is.8. 190.
3. Bichkov A.B., Smirnov V.V. // J. Phys. A: Math. and Theor. 2013. V.46. 015303.
4. Bichkov A.B., Smirnov V.V. // Laser Phys. 2013. V.23. 055302.
5. Birkeland T., Nepstad R., Forre M. // Phys. Rev. Lett. 2010. V.104. 163002.
6. Aquila A., et al. // Structural Dynamics. 2015. V.2. 041701.
7. Kupper J., et al. // Phys. Rev. Lett. 2014. V.112. 083002.

В.С. БУШМАКИН<sup>1,2</sup>, И.С. КОЖОКАРУ<sup>1,2,3</sup>, В.В. ЦЫГАНOK<sup>1,2,3</sup>,  
И.А. ЛУЧНИКОВ<sup>1,2,3</sup>, Э.Т. ДАВЛЕТОВ<sup>1,2,3</sup>, Д.Н. КУБЛИКОВА<sup>1,2</sup>,  
С.В. ПЯТЧЕНКОВ<sup>1</sup>, Д.Д. СУКАЧЕВ<sup>1,4,5</sup>, А.В. АКИМОВ<sup>1,3,4</sup>

<sup>1</sup>Российский квантовый центр, Сколково, Московская обл.

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет),  
Долгопрудный

<sup>3</sup>Техасский университет А&М, Колледж-Стейшен, США

<sup>4</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

<sup>5</sup>Гарвардский университет, Кембридж, США

## ФОТОИНДУЦИРОВАННЫЕ СТОЛКНОВЕНИЯ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ АТОМОВ ТУЛИЯ

В работе представлена загрузка до  $10^8$  атомов тулия в магнитооптическую ловушку (МОЛ) в слабом охлаждающем переходе 530,7 нм с последующей перегрузкой в оптическую дипольную ловушку (ОДЛ) с приблизительно 10% эффективностью. Были изучены фотоиндуцированные столкновения и измерена константа неупругих бинарных столкновений, достигающая  $\beta \sim 2 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ . Также, исследование ОДЛ позволило зафиксировать резонансы Фешбаха при слабых магнитных полях.

V.S. BUSHMAKIN<sup>1,2</sup>, I.S. COJOCARU<sup>1,2,3</sup>, V.V. TSYGANOK<sup>1,2,3</sup>,  
I.A. LUCHNIKOV<sup>1,2,3</sup>, E.T. DAVLETOV<sup>1,2,3</sup>, D.N. KUBLIKOVA<sup>1,2</sup>,  
S.V. PYATCHENKOV<sup>1</sup>, D.D. SUKACHEV<sup>1,4,5</sup>, A.V. AKIMOV<sup>1,3,4</sup>

<sup>1</sup>Russian Quantum Center, Skolkovo, Moscow region

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

<sup>3</sup>Texas A&M University, City of College Station, USA

<sup>4</sup>Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

<sup>5</sup>Harvard University, Cambridge, USA

## LIGHT ASSISTED COLLISIONS IN ULTRACOLD TULIUM

Demonstration of loading of up to  $\sim 10^8$  thulium atoms into a magneto-optical trap (MOT) on the weak cooling transition at 530.7 nm with further transferring into an optical dipole trap (ODT) with about 3% efficiency is presented. As the atom number in the MOT is found to depend on cooling light properties light-assisted collisions were investigated so that inelastic binary collisions losses are found to be around  $\beta \sim 2 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ . ODT investigation enabled low-field Feshbach resonances detection.

Построение квантовых симуляторов является перспективным подходом к изучению свойств сложных квантовых систем. Идея

квантового симулятора заключается в построении контролируемой квантовой механической системы, функция Гамильтона которой имитирует гамильтониан изучаемой системы. Таким образом, квантовый симулятор позволяет наблюдать за динамикой системы и ее откликом на изменение параметров системы, не решая квантово-механических уравнений. Таким симулятором могут служить ультрахолодные атомы, находящиеся в оптической решетке.

Для построения квантовых симуляторов на основе холодных атомов необходимо достижение ультранизких температур (Бозе-Эйнштейновской конденсации) и реализация контролируемого взаимодействия между атомами. Достижение первого условия требует лазерного охлаждения большого количества атомов до как можно более низких температур. Действительно, конденсация атомов в одно минимально возможное квантовое состояние возможна только при большой фазовой плотности. Тем самым необходима как большая пространственная плотность атомов, так и их низкая температура. Достижение же предельно низких температур осуществляется за счет испарительного охлаждения – снижения температуры ансамбля атомов путем потери наиболее быстрых атомов с последующей термализацией. Второе условие может быть достигнуто за счет использования так называемых резонансов Фешбаха. В настоящее время нашей группой ведется работа по реализации квантового симулятора на основе стабильного изотопа атома тулия. Данный редкоземельный атом, относящийся к лантаноидам, обладает относительно большим магнитным моментом в основном состоянии, благодаря наличию свободной вакансии на  $f$  оболочке, находящейся под заполненной  $s$  оболочкой. Это преимущество делает атом тулия удобным инструментом для моделирования диполь-дипольных взаимодействий и приводит к наличию Фешбаховских резонансов в небольшом магнитном поле, которые можно использовать для контроля взаимодействия атомов. Благодаря наличию узкого оптического перехода (530.7 нм) и большого магнитного момента атом тулия является выгодным кандидатом для данного эксперимента.

В данной работе обсуждается перегрузка большого числа атомов тулия из Зеемановского замедлителя в магнитооптическую ловушку в узком оптическом переходе. Проведено исследование столкновительных свойств атома тулия вблизи охлаждающего перехода, обсуждается влияние столкновений на число загружаемых атомов. Представлены экспериментальные результаты по измерению резонансов Фешбаха в атомах тулия.

Н.В. БЕЛЬКО<sup>1</sup>, М.П. САМЦОВ<sup>1,2</sup>, Г.А. ГУСАКОВ<sup>1,2</sup>,  
Д.С. ТАРАСОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Белорусский государственный университет, Минск*

<sup>2</sup>*Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко, Минск, Беларусь*

## **СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУР ИНДОТРИКАРБОЦИАНИНОВОГО КРАСИТЕЛЯ**

Индотрикарбоцианиновый краситель в воде-этанол образует наноструктуры. Им соответствует узкая полоса поглощения, смещенная в синюю область, как в растворе, так и на кварце. Наличие наноструктур подтверждено атомно-силовой микроскопией.

N.V. BELKO<sup>1</sup>, M.P. SAMTSOV<sup>1,2</sup>, G.A. GUSAKOV<sup>1,2</sup>,  
D.S. TARASOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Belarusian State University, Minsk*

<sup>2</sup>*A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems, Minsk, Belarus*

## **SPECTRAL PROPERTIES OF NANOSTRUCTURES OF INDOTRICARBOCYANINE DYE**

Indotricarbocyanine dye forms nanostructures in water-ethanol. The nanostructures possess a narrow, blue-shifted absorption band in solution as well as on quartz. The formation of the nanostructures was confirmed by atomic force microscopy.

Органические наноструктуры могут найти разнообразные применения, например, в качестве компонентов солнечных батарей, спектральных сенсibilizаторов, элементов оптоэлектронных устройств [1].

Было установлено, что молекулы индотрикарбоцианинового красителя (далее ЦК1) в воде-этанол образуют наноструктуры. Их получали с помощью перекристаллизации [2], для чего концентрированный раствор ЦК1 в этаноле вводили в воду. Поскольку ЦК1 растворим в этаноле, но нерастворим в воде, происходила самоорганизация молекул красителя, о чем свидетельствовало изменение цвета раствора.

Свойства наноструктур ЦК1 в воде-этанол изучали по их спектрам поглощения. При концентрациях красителя менее 1,5 мкМ в спектрах поглощения присутствовала полоса с максимумом на 707 нм и полушириной 95 нм. Данная полоса обусловлена поглощением мономеров красителя. Для концентраций ЦК1 1,5÷5,0 мкМ спектры поглощения растворов постепенно менялись в течение 60-120 минут после

приготовления. В спектрах появлялась новая полоса поглощения 2 с одновременным падением оптической плотности в длинноволновой полосе 1 (рис. 1а). Новая полоса была смещена в синюю область; ее максимум был расположен на 515 нм, а полуширина составляла 22 нм.

Поскольку практические применения органических наноматериалов часто требуют их размещения на твердых носителях, были зарегистрированы спектры поглощения наноструктур ЦК1 на кварце. В данных спектрах также присутствовала полоса 2 (рис. 1б). Наличие этой полосы свидетельствует о том, что наноструктуры не разрушаются после испарения растворителей. Полоса 2, наблюдаемая в спектре наноструктур на кварцевой подложке, обладала выраженной асимметрией. Возможно, основной максимум и длинноволновое плечо этой полосы относятся к различным поглощающим центрам.

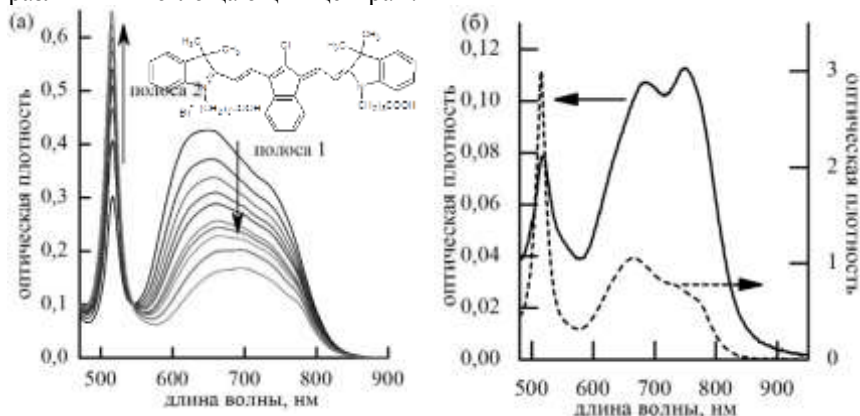


Рис. 1. Спектры поглощения раствора красителя в воде-этаноле в течение 2 часов после приготовления (5,0 мкМ красителя); на вставке структурная формула ЦК1 (а); спектр поглощения ЦК1 на кварце (сплошная линия) и в соответствующем растворе (штриховая линия; 25 мкМ красителя) (б)

С помощью атомно-силовой микроскопии было установлено, что существуют различные типы наноструктур ЦК1, например, объекты длиной несколько микрометров и толщиной порядка десяти нанометров, а также объекты с размерами в несколько нанометров. Наличие различных наноструктур может быть причиной асимметрии коротковолновой полосы поглощения в спектре на кварце.

#### Список литературы

1. Zhao Y.S., Fu H., et al. // Adv. Mater. 2008. 20. P.2859.
2. Kasai H., et al. // Japan. J. Appl. Phys. 1992. 31. L1132.

С.А. АЛИЕВ, Н.С. ТРОФИМОВ, Т.К. ЧЕХЛОВА  
*Российский университет дружбы народов, Москва*

## **ОСОБЕННОСТИ ПЛЕНОК ДИОКСИДА ТИТАНА, СИНТЕЗИРОВАННЫХ ГЕЛЬ-МЕТОДОМ**

В работе проведено исследование структурных и оптических свойств пленок диоксида титана изготовленных по гель-технологии при различных параметрах технологического режима. Исследования проводились с использованием методов интегральной оптики, микроскопии высокого разрешения, спектрофотометрии, ИК и ЭПР спектроскопии. Установлено, что по сравнению с пленками диоксида титана, изготовленных золь-гель методом, гель-пленки отличались по многим параметрам: показателю преломления, термооптическому коэффициенту, увеличенной в процентном отношении доли анатаза среди структурных модификаций диоксида титана и уменьшению пористости. Обнаружена гидрофобность гель-пленок.

S.A. ALIEV, N.S. TROFIMOV, T.K. CHEKHLOVA  
*Peoples' Friendship University of Russia, Moscow*

## **PROPERTIES OF GEL-METHOD SYNTHESIZED TITANIUM DIOXIDE FILMS**

The article provides a study on structural and optical properties of titanium dioxide films synthesized by gel-method in various settings of operating conditions. The research was conducted using the methods of integrated optics, high-resolution microscopy, spectrophotometric analysis, IR and EPR-spectroscopy. It is found that, compared with titanium dioxide synthesized by gel-method, the gel-films differed in many indicators: the refractive index, thermo-optic coefficient, percentagewise increased anatase share among the titanium dioxide structural modifications of and the reduction of porosity. The hydrophobic nature of gel-films was discovered.

В последние годы (2000-2015) объектами пристального внимания исследователей являются сенсорные, адсорбционные, оптические, электрические и каталитические свойства диоксида титана ( $\text{TiO}_2$ ). Помимо этого, пленки  $\text{TiO}_2$  обладают хорошими оптическими свойствами, необходимыми для создания на их основе многофункциональных элементов интегральной оптики и фотоники.

Разработанный на кафедрах прикладной физики и общей химии новый метод синтеза пленок диоксида титана является низкотемпературным и не требует применения дорогостоящего и сложного оборудования.

Исследования проводились на образцах пленок диоксида титана, изготовленных золь-гель и гель-методами по технологиям, описанным в [1, 2]. Установлено, что использование гель-метода синтеза пленок позволило значительно увеличить показатель преломления до 2,3 – 2,5 за счет более плотной структуры, чем золь-гель пленок. Исследование ИК спектров подтвердило уплотнение структуры и уменьшением пористости. Спектрограммы пропускания были получены на ИК-Фурье спектрометре Nicolet 6700 (рис. 1: А – для золь-гель пленки; В – для гель-пленки). На спектрограммах золь-гель пленок виден пик поглощения с центром на длине волны 3,3 мкм, характерный для воды. При нагреве пленок от комнатной температуры до 150°C этот пик уменьшался, затем исчезал. По-видимому, этот пик связан с поглощением воды, находящейся в порах. По мере возрастания температуры вода испарялась и характерное поглощение уменьшалось. Отсутствие пика поглощения воды в гель-пленках свидетельствует о том, что пористость материала значительно меньше, что свидетельствует о проявлении гидрофобных свойств пленки.

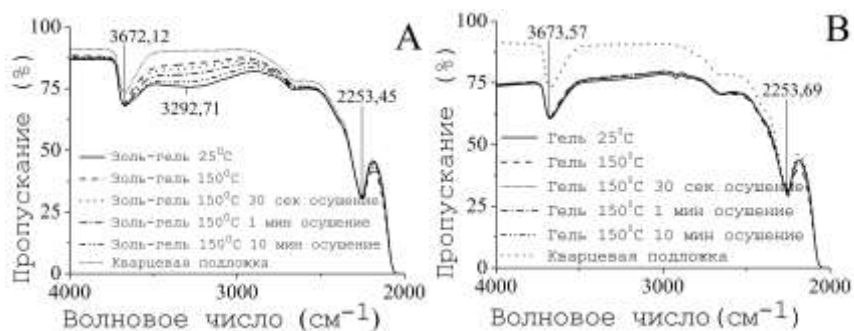


Рис. 1. ИК спектры пропускания золь-гель (А) и гель (В) пленок

Разработанный метод синтеза пленок дает дополнительные возможности для улучшения параметров устройств на их основе. Конкретные применения пленок  $\text{TiO}_2$  требует всестороннего их исследования, что и является целью настоящей работы.

#### Список литературы

1. Чехлова Т.К., Живцов С.В., Погосян А.С. Оптические волноводы на основе плёнок, изготовленных по технологии золь-гель // Вестник РУДН. Серия Физика. 2005. № 1 (13). С.35-47.
2. Evtushenko Yu.M., Romashkin S.V., Trofimov N.S., Chekhlova T.K.. Optical Properties of  $\text{TiO}_2$  Thin Films // Physics Procedia. 2015. V.73. P.100-107.

Е.И. КОНСТАНТИНОВА<sup>1,2</sup>, В.В. БРЮХАНОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград*

<sup>2</sup>*Калининградский государственный технический университет*

**БЕЗЫЗЛУЧАТЕЛЬНЫЙ РЕЗОНАНСНЫЙ ПЕРЕНОС  
ЭНЕРГИИ МЕЖДУ МОЛЕКУЛАМИ АНТРАЦЕНА  
И КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ CdZnSZnS И CdZnSeS  
В ПЛЕНКАХ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА**

В работе проведено оптическое изучение безызлучательного переноса энергии между молекулами антрацена и квантовыми точками (КТ) CdZnSZnS и CdZnSeS в пленке полиметилметакрилата (ПММА).

E.I. KONSTANTINOVA<sup>1,2</sup>, V.V. BRYUKHANOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Immanuel Kant Baltic Federal State University, Kaliningrad*

<sup>2</sup>*Kaliningrad State Technical University*

**NONRADIATIVE RESONANCE ENERGY TRANSFER  
BETWEEN ANTHRACENE MOLECULES AND CdZnSZnS  
AND CdZnSeS QUANTUM DOTS  
IN POLYMETHYLMETHACRYLATE FILMS**

In this work, it was carried out of the optical study nonradiative resonance energy transfer between anthracene molecules and CdZnSZnS (QD400) and CdZnSeS (QD550) quantum dots (QD) in polymethylmethacrylate films (PMMA).

Оптические свойства полупроводниковых наночастиц – КТ, благодаря высокому квантовому выходу люминесценции, а также широкой полосе возбуждения, перспективны для создания сенсорных элементов, применимых в биологии и медицине [1]. Безызлучательные переносы энергии с КТ на исследуемую молекулу, а также с молекулы на КТ широко изучаются в настоящее время [2, 3].

В данной работе проводилось спектрально-кинетическое изучение безызлучательного резонансного процесса переноса энергии между молекулами антрацена ( $C=5,6 \cdot 10^{-4}$  М) и КТ с максимумом люминесценции на 400 нм (QD400) и 550 нм (QD550) в пленке ПММА ( $\delta \approx 30$  мкм). В пленке антрацен-QD550, вместе с убыванием интенсивности люминесценции донора (антрацена) было обнаружено увеличение интенсивности акцептора (QD550) (рис. 1). Времена жизни



люминесценции QD550 ( $C=1,3 \cdot 10^{-5}$  М) увеличились с 13,1 до 16,4 нс. Константа скорости переноса составила  $1,7 \cdot 10^8$  с $^{-1}$ .

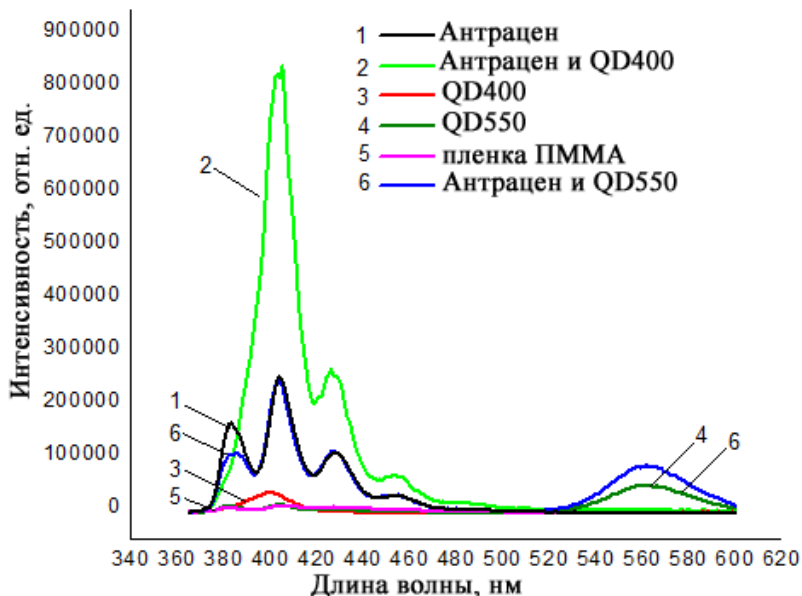


Рис. 1. Спектры люминесценции молекул антрацена и квантовых точек CdZnSZnS (QD400) и CdZnSeS (QD550) в пленках полиметилметакрилата. Спектры получены на приборе Fluorolog-3 (Франция) при возбуждении и длиной волны  $\lambda=350$  нм

Также в работе была оценена возможность повышения эффективности резонансного переноса на основе трехкаскадного переноса: QD550-QD400, QD400-антрацен и антрацен-QD550.

Результаты получены в рамках государственного задания Минобрнауки России № 3.809.2014/К.

#### Список литературы

1. Li Y., Miao M., et. al. // Chem. Lett. 2016.
2. Nyk M., Palewska K., Kepinski L., et. al. // J. Lumin. 2010. V.130. P.2487-2490.
3. Smirnov M.S., Ovchinnikov O.V., et. al. // J. Lum. 2014. V.156. P.212.

Д.В. ВИКУЛИН, К.Н. АЛЕКСЕЕВ, М.А. ЯВОРСКИЙ  
*Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь*

## **НОВЫЙ МЕХАНИЗМ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ**

Предложена последовательная модель акустооптического взаимодействия в циркулярных оптических волокнах. Получены аналитические выражения для мод и постоянных распространения оптического волокна, по которому распространяется изгибная акустическая волна. На основании полученных результатов дано объяснение экспериментально наблюдаемой модовой конверсии, сопровождающаяся изменением частоты оптического поля. Показано, что в рамках предложенной модели имеет место принципиально новое свойство модовой конверсии - анизотропность - зависимость длины полного преобразования энергии падающего на волокно поля от направления его линейной поляризации по отношению к поляризации акустической волны.

D.V. VIKULIN, C.N. ALEXEYEV, M.A. YAVORSKY  
*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol*

## **A NEW MECHANISM OF ACOUSTO-OPTIC INTERACTION IN OPTICAL FIBERS**

We have proposed a novel self-consistent model of the acousto-optic interaction in circular optical fibers. The analytical expressions for the fiber modes and propagation constants were obtained. We unveil a new effect: the dependence of the energy transformation length of an incident field on the direction of its linear polarization with respect to the acoustic wave polarization.

Известно, что оптические волокна направляют как оптические, так и акустические волны [1], что обеспечивает уникальные условия для высокоэффективного взаимодействия между световыми и акустическими пучками. Естественно, что значительные усилия исследователей сосредоточены на изучении акустооптического взаимодействия (АОВ) в обычных оптических волокнах. Как результат, предложено и реализовано значительное число устройств, основанных на АОВ, таких как частотные преобразователи, настраиваемые фильтры, волоконные ответвители [2].

В общепринятой модели [1] АОВ процесс распространения изгибной акустической волны рассматривается как механический изгиб волокна. Исходя из этих представлений, получают выражения для

соответствующей поправки к показателю преломления. Несмотря на то, что данная модель описывает экспериментально наблюдаемую модовую конверсию, она содержит принципиальные противоречия. Действительно, вектор деформации при изгибе не совпадает с тем, что является решением уравнения Похгаммера для цилиндрического стержня в длинноволновом пределе (длина акустической волны много больше диаметра волокна). Из этого следует, например, что форма поперечного сечения волокна испытывает деформацию в модели с искусственно принесенным изгибом, но сохраняется в логически последовательной модели на основе теории колебаний стержня.

Целью работы является построение последовательной модели АОВ и получение на ее основе аналитических выражений для резонансных оптических мод в циркулярных оптических волокнах.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи исследования:

1) в рамках предложенной модели получить выражение для показателя преломления циркулярного оптического волокна с АОВ, индуцированным изгибной акустической волной;

2) определить резонансные моды и соответствующие спектры постоянных распространения циркулярных оптических волокон с АОВ путем аналитического решения волнового уравнения методом теории возмущений [3].

В качестве основных результатов работы можно выделить следующие:

1) предложена новая логически последовательная модель АОВ в оптических волокнах с изгибной акустической волной;

2) получен тензорный показатель преломления циркулярного оптического волокна с АОВ. Получены аналитические выражения для мод и постоянных распространения циркулярных оптических волокон с изгибной акустической волной;

3) показано, что в рамках предложенной модели АОВ имеет место новый эффект анизотропной модовой конверсии  $LP_0 \leftrightarrow LP_1$  - зависимость длины полного преобразования энергии падающего на волокно поля от направления его линейной поляризации по отношению к поляризации акустической волны. Данный эффект может быть положен в основу экспериментальной проверки предложенной нами модели.

#### *Список литературы*

1. Engan H.E., Kim B.Y., Blake J.N., Shaw H.J. // J. of Lightwave techn 1988. V.6 (3). P.428.
2. Kim B.Y., et. al // Opt. Lett. 1986. V.11. P.389.
3. Alexeyev C.N., Barshak E.V., et al // Journal of Optics. 2010. V.12 (11).

Д.Л. ПОРОХОВНИЧЕНКО, Е.А. ДЬЯКОНОВ, В.Б. ВОЛОШИНОВ  
*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

## **ОПТИМАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В КРИСТАЛЛЕ КРС-5**

Рассчитаны коэффициенты акустооптического качества кристаллов КРС-5 в зависимости от направления распространения и поляризации взаимодействующих волн. Найдены оптимальные конфигурации акустооптического взаимодействия в обратном коллинеарном, полуколлинеарном и поперечном режимах дифракции.

D.L. POROKHOVNICHENKO, E.A. DYAKONOV,  
V.B. VOLOSHINOV  
*Lomonosov Moscow State University*

## **OPTIMAL PARAMETERS OF ACOUSTO-OPTICAL INTERACTION IN KRS-5 CRYSTAL**

Acousto-optic figures of merit of KRS-5 crystals are calculated for different directions and polarizations of interacting waves. The optimal configurations of backward collinear, semicollinear and transverse acousto-optic interaction are found.

Современные акустооптические (АО) устройства позволяют управлять интенсивностью, частотой и направлением электромагнитного излучения с длинами волн не более 20 мкм. Актуальной задачей является разработка методов управления инфракрасным излучением с большими длинами волн, источниками которого являются, в частности, квантово-каскадные лазеры. Кроме того, в дальнем ИК-диапазоне возможны такие режимы АО взаимодействия, которые затруднительно реализовать в видимом диапазоне, например обратный коллинеарный или полуколлинеарный [1].

Наибольшей спектральной областью пропускания в дальнем ИК диапазоне среди эффективных АО материалов обладают галогениды тяжелых металлов, в особенности ртути и таллия. Так, кристалл КРС-5 (твердый раствор ТlВг-ТlИ) прозрачен в диапазоне от красной области видимого спектра до длин волн порядка 45 мкм [2].

В данной работе рассматриваются три режима дифракции – обратный коллинеарный, полуколлинеарный и поперечный. Вычислены коэффициенты АО качества при дифракции на ультразвуковых волнах, распространяющихся в произвольных направлениях в плоскостях (001) и (110) кристалла. Данные о физических свойствах КРС-5 взяты из работ

[2, 3]. Расчеты проведены для длины волны излучения, равной 10,6 мкм, однако полученные результаты можно распространить и на большие длины волн. При этом коэффициент АО качества на длине волны 40 мкм падает в 1,5 раза по сравнению с длиной волны 10 мкм из-за дисперсии показателя преломления. Частота ультразвука обратно пропорциональна длине волны излучения, поэтому на длине волны 40 мкм она будет в 4 раза меньше, чем при 10 мкм. Коэффициент затухания ультразвука при этом уменьшится пропорционально квадрату частоты, то есть в 16 раз.

Наибольшие коэффициенты АО качества для коллинеарного и полуколлинеарного взаимодействия реализуются в плоскости (110) при дифракции на сдвиговой ультразвуковой волне и равны  $140 \times 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$  и  $230 \times 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$ , соответственно. В обоих случаях АО взаимодействие сопровождается сменой поляризации излучения. Волновой вектор ультразвука составляет с осью [001] угол  $31^\circ$  и  $38^\circ$ , а соответствующие частоты равны 460 МГц и 425 МГц. Более высокий коэффициент АО качества для коллинеарного взаимодействия, равный  $200 \times 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$ , получается при использовании продольной волны в направлении [110], однако частота ультразвука при этом равна 900 МГц, а поляризация излучения при дифракции не изменяется. Коэффициент затухания сдвиговой волны на частоте 450 МГц и продольной волны на частоте 900 МГц приблизительно одинаков и имеет порядок 22...24 дБ/см [4].

В плоскости (001) кристалла коэффициенты АО качества для коллинеарного и полуколлинеарного режимов оказываются меньше, чем в плоскости (110), а частоты ультразвука сравнимы с указанными выше.

Интересна также конфигурация поперечного АО взаимодействия, при которой сохраняется состояние поляризации излучения. Наибольший коэффициент качества при таком условии равен  $170 \times 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$  для дифракции в плоскости (001) на квазипродольной ультразвуковой волне, волновой вектор которой составляет угол  $18^\circ$  с осью [100].

Абсолютный максимум коэффициента АО качества в кристалле соответствует поперечной дифракции на сдвиговой волне в плоскости (001), и составляет величину  $640 \times 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$ .

Работа поддержана грантом РФФ № 14-12-00380.

#### *Список литературы*

1. Дьяконов Е.А., Волошинов В.Б., Поликарпова Н.В. // Опт. и спектр. 2015. Т.118. С.172.
2. Кристаллы галогенидов таллия. Получение, свойства и применение / под ред. Богданова С.В. Новосибирск, 1989.
3. Мاستихин В.М., Богданов С.В., Дарвойд Т.И. и др. // ОМП. 1986. Т.78. С.36.
4. Белоусов А.П., Лисицкий И.С., Салахитдинов Ф. и др.// Акуст. журн. 1986. Т.32. С.656.

**М.И. КУПРЕЙЧИК, В.И. БАЛАКШИЙ**

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

## **АКУСТООПТИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВБЛИЗИ ОПТИЧЕСКИХ ОСЕЙ В ОПТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ДВУОСНЫХ КРИСТАЛЛАХ**

Исследована геометрия акустооптического взаимодействия в оптически активных двуосных кристаллах, когда направления волнового вектора ультразвука лежат вблизи плоскости, ортогональной к одной из оптических осей, а падающий и дифрагированный световые пучки распространяются вблизи оптической оси. Показано, что заметная оптическая активность кристаллов приводит к существенному изменению характеристик взаимодействия в области тангенциальной геометрии, что необходимо учитывать при конструировании акустооптических устройств.

**M.I. KUPREYCHIK, V.I. BALAKSHY**

*Lomonosov Moscow State University*

## **ACOUSTO-OPTIC INTERACTION NEAR OPTICAL AXES IN HYROTROPIC BIAXIAL CRYSTALS**

Acousto-optic interaction geometry in hyrotropic biaxial crystals is examined for cases when the direction of ultrasound wave vector is close to the plane which is orthogonal to one optical axis, whereas incident and diffracted optical beams propagate near the optical axis. It is established that high optical activity results in noticeable changes of interaction characteristics in the region near tangential geometry of interaction. Therefore this feature should be taken in account at designing acousto-optic devices.

При конструировании акустооптических (АО) устройств в подавляющем большинстве случаев в качестве среды для взаимодействия световых и акустических волн используются одноосные кристаллы с существенной анизотропией свойств [1]. Однако благодаря особому типу оптической анизотропии, присущему только двуосным кристаллам, в них реализуются такие варианты АО взаимодействия, которые принципиально невозможны в одноосных кристаллах, что позволяет рассчитывать на создание АО устройств с улучшенными характеристиками [2-3].

Особый интерес для исследования представляет геометрия АО взаимодействия, когда волновой вектор ультразвука почти ортогонален к

одной из оптических осей, а направления падающего и дифрагированного световых пучков близко к оптической оси. Для такого варианта АО взаимодействия существуют срезы кристаллов, характеризующиеся чрезвычайно низкой угловой и частотной селективностью в области тангенциальной геометрии, что открывает новые возможности для улучшения характеристик АО устройств [3]. Известно, что в силу сложного вида волновых поверхностей в области оптических осей двуосного кристалла, рассмотренный вариант АО взаимодействия оказывается весьма чувствительным к изменению направления волнового вектора ультразвука, что предъявляет особые требования к точности изготовления АО устройства [3]. Необходимо отметить, что направления оптических осей двуосного кристалла зависят от длины волны падающего излучения, поэтому для различных спектральных компонент падающего светового пучка реализуются различные геометрии АО взаимодействия. Для рассмотренного варианта АО взаимодействия этот факт приводит к существенному сужению спектрального диапазона.

В ходе проведенных расчетов оказалось, что кристаллы, характеризующиеся существенной оптической активностью, менее чувствительны к изменению направления ультразвука в пределах рассматриваемой геометрии. При этом заметная оптическая активность кристаллов приводит к существенному изменению характеристик АО взаимодействия, что необходимо учитывать при конструировании акустооптических устройств. Расчеты выполнены для кристалла йодноватой кислоты ( $\alpha$ -НЮЗ), для которого известны все компоненты диэлектрического, упругого и фотоупругого тензоров, а также тензора гирации [4-5].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (РНФ), грант № 14-22-00042.

#### *Список литературы*

1. Балакший В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики. М., 1985.
2. Balakshy V.I., Kupreychik M.I. Acousto-optics of biaxial crystals // Physics Procedia. 2015. V.70. P.758-761.
3. Balakshy V.I., Kupreychik M.I. Anisotropic light diffraction in a biaxial crystal of alpha-iodic acid // Phys. Wave Phenom. 2016. V.24. №1. P.58-63.
4. Pinnow D.A., Dixon R.W. // Appl. Phys. Lett. 1968. V.13. №4. P.156-158.
5. Иванов Н.Р., Чихладзе О.А. Экспериментальное определение тензора гирации в ромбическом кристалле  $\alpha$ -НЮЗ // Кристаллография. 1976. Т.21. №1. С.125-132.

С.Н. АНТОНОВ, А.Л. ФИЛАТОВ

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН***АКУСТООПТИЧЕСКИЙ МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ПРОФИЛЕМ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА**

Предложен и экспериментально исследован новый акустооптический метод преобразования энергетического профиля одномодового лазерного излучения в заданный. Метод основан на эффекте многолучевой высокоэффективной акустооптической дифракции. Экспериментально показано, что новый метод, позволяет с характерным временем менее 10 мксек и потерей мощности около 10% создавать сложные, профили которые, например, могут применяться для спекания порошка в 3D принтерах.

S.N. ANTONOV, A.L. FILATOV

*Fryazino branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS***ACOUSTO-OPTIC TECHNIQUE FOR LASER BEAM SHAPING**

New acousto-optic multiple-beam technique application is proposed for laser beam shaping. It was shown experimentally that the transformation power losses is about 10% and transformation time is less than 10  $\mu$ s. This technique can be useful to 3D printing, which require a complicated form for laser beam shaping.

Угловое распределение интенсивности одномодового лазерного излучения, которое показано непрерывной линией на рис. 1, не является оптимальным для систем лазерной обработки материалов: маркировки, закалки, резки, т.к. пороговому воздействию (испарению, горению) подвергается только центральная область, на которую сфокусирован лазерный луч. Если энергетический порог воздействия равен уровню  $I_0=0.9$ , то отношение площади заштрихованной части (полезной мощности) ко всей площади под кривой (полной мощности) составляет  $\approx 35\%$ , более 60% энергии луча не используется. Поэтому в таких системах

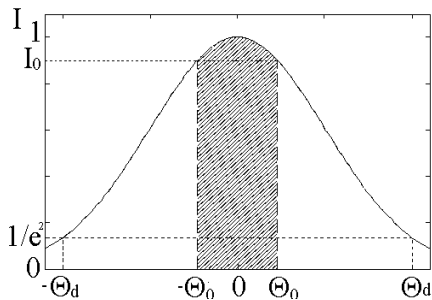


Рис. 1. Гауссово распределение  
интенсивности



целесообразно формировать П-образный профиль распределения интенсивности.

Предлагаемый новый метод основан на теории многолучевой высокоэффективной акустооптической (АО) дифракции, которая была разработана [1] для подавления паразитных интермодуляционных дифракционных порядков АО взаимодействия при многочастотном электрическом управляющем сигнале. На рис. 2 показаны экспериментальные графики пространственное распределение мощности (P) лазерного излучения после АО взаимодействия и фокусировки линзой с фокусным расстоянием 1 м, выполненные при помощи измерителя профиля луча THORLABS BP104. На рис. 2а) показан профиль одного луча при одночастотном электрическом управляющем сигнале  $F=41$  МГц. рис. 2б) соответствует профилю пяти лучей при пятичастотном эквидистантном сигнале  $F=\sum(A_n(f+n\Delta f+\varphi_n))$   $f=39$  МГц,  $\Delta f = 1$  МГц,  $n=0\div 4$ .  $A_n$  и  $\varphi_n$  для всех рисунков соответствуют теории [2]. Финальные профили, которые представлены на рис.2с), 2д), получены при  $f=40.4$  МГц,  $\Delta f = 0.3$  МГц,  $n=0\div 4$ . Варьирование параметров  $A_n$  и  $\varphi_n$  позволяет получить П-образный (рис.2с) и тестовый (рис.2д) профили с характерным временем формирования не более 10 мксек и потерей мощности около 10%.

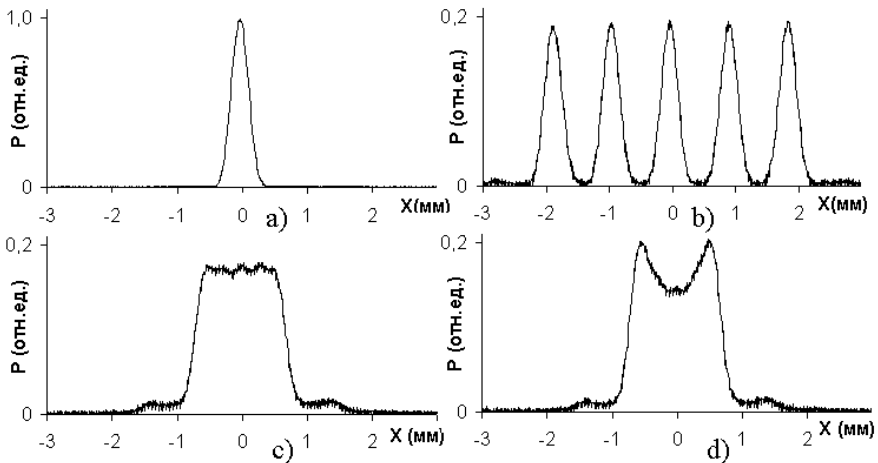


Рис. 2. Экспериментальные результаты

*Список литературы*

1. Антонов С.Н., Резвов Ю.Г. // ЖТФ. 2007. Т.77. Вып.8. С.93-100.

Н.И. ПЕТРОВ, В.И. ПУСТОВОЙТ

*Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва*

## **АКУСТООПТИЧЕСКИЙ РЕЗОНАТОР СО СВЕРХУЗКОЙ ШИРИНОЙ ПОЛОСЫ ПРОПУСКАНИЯ**

Рассмотрена задача о брэгговской дифракции света в резонаторе Фабри-Перо, образованном двумя акустооптическими зеркалами, с учетом поглощения света. Показана возможность существенного повышения спектрального разрешения таких резонаторов за счет пространственного изменения свойств среды.

N.I. PETROV, V.I. PUSTOVOIT

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

## **ACOUSTO-OPTIC RESONATOR WITH ULTRA-NARROW BANDWIDTH**

The problem of the Bragg diffraction of light in the Fabry-Perot resonator formed by two dynamic acousto-optic mirrors taking into account the absorption of light is considered. The possibility of a significant increase in spectral resolution of such resonators due to the spatial variation of the properties of the medium is shown.

Периодические структуры, создаваемые в кристаллах акустической волной, обладают рядом преимуществ по сравнению с обычными устройствами на дифракционных решетках и позволяют достичь высокого спектрального разрешения. В [1, 2] было показано, что резкое повышение спектрального разрешения возможно за счет использования дифракционных решеток с пространственной аподизацией. В настоящей работе теоретически исследован резонатор, состоящий из двух пространственно-распределенных “зеркал”, расположенных на некотором расстоянии  $d$  друг относительно друга. Исследовано влияние этого расстояния и поглощения света в кристаллах на предельную разрешающую способность таких резонаторов. С помощью численного решения системы связанных укороченных уравнений [3], описывающих дифракцию в рассматриваемой системе, изучено влияние различных функций аподизации на дифракционные кривые отражения и проведен их сравнительный анализ. Показано, что введение дополнительной периодической структуры между двумя зеркалами приводит к повышению разрешающей способности таких резонаторов. Однако существенное повышение разрешающей способности достигается при наличии

небольшого аподизированного участка между двумя периодическими зеркалами без аподизации.

На рис. 1 представлены результаты расчетов кривых отражения и пропускания для параметров: общая длина резонатора 10 см, длина центрального участка с аподизацией  $d = 0.2$  см,  $\Delta\epsilon_0 \approx 1.5 \cdot 10^{-5}$ .

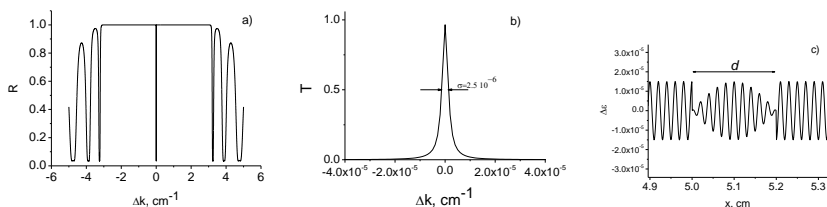


Рис. 1. Зависимость коэффициента отражения (а) и пропускания (б) от величины расстройки резонатора; вид функции аподизации  $\Delta\epsilon(x)$  (с)

Ширина линии пропускания может достигать очень малых значений. Однако предельная разрешающая способность резонатора ограничивается поглощением света. В прозрачных кристаллах с малыми коэффициентами поглощения разрешение фильтра составляет  $\Delta\lambda/\lambda \approx 10^{-11}$ , что на 3 порядка превосходит разрешение фильтра, рассмотренного в [1].

Таким образом, предложенный резонатор позволяет увеличить разрешение существующих фильтров на 5-6 порядков. Хотя поглощение света ограничивает предельно достижимое разрешение резонатора, оно приводит также к эффекту смещения резонансного пропускания по длине волны или частоте. Этот эффект может быть использован для модуляции добротности и частотной селекции продольных мод резонатора.

Полученные результаты представляют практический интерес и могут быть использованы при разработке новых дифракционных акустооптических модуляторов, фильтров и АО спектрометров, а также в измерениях гравитационных волн.

#### Список литературы

1. Афанасьев А.М., Пустовойт В.И., Чуев М.А., Медведев П.Г. // Микросистемная техника. 2004. №4. С.17-20.
2. Афанасьев А.М., Гуляев Ю.В., Пустовойт В.И. // Радиотехника и электроника. 2004. Т.49. №12. С.1526-1531.
3. Пустовойт В.И. // ДАН. 1999. Т.365. №1. С.39-43.

С.И. ИВАНОВ, А.П. ЛАВРОВ, С.А. МОЛОДЯКОВ, И.И. САЕНКО  
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

## **ДВУХКООРДИНАТНЫЙ АКУСТООПТИЧЕСКИЙ ПРОЦЕССОР ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ПУЛЬСАРОВ**

В докладе представлен двухкоординатный акустооптический (АО) процессор, предназначенный для сжатия импульсов радиоизлучения космических источников – пульсаров, диспергированных при распространении в межзвездной среде, восстановления их первоначального импульсного профиля, а также для оценки степени поляризации радиоизлучения в импульсах.

S.I. IVANOV, A.P. LAVROV, S.A. MOLODYAKOV, I.I. SAENKO  
*Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University*

## **TWO-COORDINATE ACOUSTO-OPTIC PROCESSOR FOR ESTIMATION OF PARAMETERS OF RADIO EMISSION FROM PULSARS**

The paper presents a two-coordinate acousto-optic processor designed to compress pulses of radio emission of cosmic sources – pulsars, recovering their initial pulse profile, and estimation of the degree of polarization in pulses' emission.

Проблема при регистрации радиоизлучения пульсаров связана с необходимостью компенсации дисперсионного размытия радиоимпульсов и малым отношением сигнал-шум в принимаемом радиоизлучении [1]. Нами ранее был предложен, разработан, реализован и применен в наблюдениях на радиотелескопе АО пульсарный процессор – компенсатор дисперсии [2, 3, 4]. Его основу составляет широкополосный АО спектроанализатор (когерентный Фурье-процессор) со специальным режимом работы ПЗС-фотоприемника – режимом временной задержки и накопления (ВЗН, на английском – TDI). АО пульсарный процессор инвариантен к моменту прихода импульсов радиоизлучения на его вход.

При применении двухканального АО модулятора (АОМ) Фурье-процессор выполняет помимо спектральной, еще и мгновенную корреляционную обработку сигналов  $S_1$  и  $S_2$ , поступающих на вход АОМ, см. рис. 1, формируя в выходной плоскости помимо спектра (по оси  $x$ ) и интерферограмму по ортогональной оси  $y$ . Параметры интерферограммы – контраст, сдвиг – связаны с относительными амплитудами и фазами

сигналов  $S_1$  и  $S_2$ . При обработке радиоизлучения пульсаров сигналы  $S_1$  и  $S_2$  формируются двумя линейными облучателями с ортогональной поляризацией в приемном тракте радиотелескопа.

Нами создан макет двухканального АО процессора на основе HeNe лазера ЛГН-207А, АОМ на кристалле  $\text{TeO}_2$  с полосой 60 МГц, матричного ПЗС-фотоприемника TC245 (TC237) фирмы Texas Instruments. Специально разработанное программное обеспечение позволяло реализовать их работу и в режиме ВЗН. На макете выполнен ряд экспериментов. Для примера, на рис. 2 представлено зарегистрированное 2D-распределение на выходе АО процессора при подаче на вход АОМ в качестве  $S_1$  и  $S_2$  периодического ЛЧМ-радиосигнала (модель диспергированных импульсов). Нижнее распределение зарегистрировано при стандартной работе ПЗС-фотоприемника (датчик изображения, время накопления 20 мс), а верхнее – при работе в режиме ВЗН с синхронным движением отклика на ЛЧМ-радиосигнал и зарядовых пакетов по fotocувствительному полю ПЗС-фотоприемника. Верхнее распределение показывает периодический сжатый (и продетектированный) ЛЧМ радиопульс и фазовые соотношения между сигналами  $S_1$  и  $S_2$ . В работе обсуждаются методы обработки интерферограмм в сжатых сигналах для определения параметров Стокса в принимаемом радиоизлучении пульсаров.

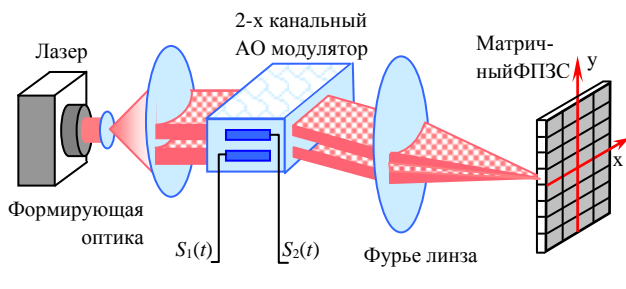


Рис. 1. Структурная схема двухкоординатного АО пульсарного процессора

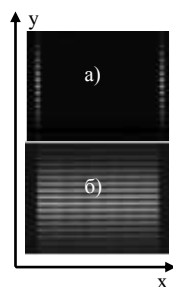


Рис. 2. Интерферограмма на выходе АО процессора

#### Список литературы

1. Kraus J. Radio Astronomy. New York: McGraw-Hill Book, 1966.
2. Esepkina N.A., et al. // Soviet Journal of Quantum Electronics. 1995. V.25(10). P.956.
3. Esepkina N.A., et al. // Technical Physics Letters. 2003. V.29(11). P.894.
4. Lavrov A.P., Molodyakov S.A. // Instrum. and Experim. Techniques. 2015, V.58(1). P.132.

А.А. МУХАМАДИЕВ

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛНОСТЬЮ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ АКУСТООПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Приведена концепция и особенности функционирования полностью оптической информационно-измерительной системы на основе акустооптических элементов. Представлены принципы построения системы.

A.A. MUKHAMADIEV

*Ufa State Aviation Technical University*

## **CREATING ALL-OPTICAL INFORMATION-MEASURING SYSTEM BASED ON THE ACOUSTO-OPTIC ELEMENTS**

Shows the concept and features of functioning of all-optical information-measuring systems based on acousto-optic elements. Presents the principles of creation of system.

В телекоммуникационной отрасли все большее распространение получают полностью оптические сети. Основным достоинством подобных систем является отсутствие электронных компонентов, осуществляющих коммутацию, фильтрацию и перегруппирование оптических сигналов, поэтому они свободны от целого ряда недостатков, присущих электронным компонентам [1]. В тоже время следует отметить все большее распространение распределенных информационно-измерительных систем (ИИС) различного назначения. Возможность привнесения новых качественных и количественных характеристик путем синтеза вышеизложенных направлений позволит сформировать полностью оптическую ИИС.

Целью работы является исследование характеристик полностью оптической ИИС на основе акустооптических элементов.

В конструкции полностью оптической ИИС оптический сигнал передается между основными элементами без промежуточных преобразований в электрическую форму, а именно, сигнал от акустооптического измерительного преобразователя может быть в зависимости от условий эксплуатации обработан либо на месте, либо передан по волоконно-оптической системе в определенный узел

обработки без промежуточных трансформаций, а следовательно, без внесения искажения и влияния на точность и информативность сигнала. Естественно, определенные искажения будут вноситься и при прохождении сигнала по оптоволокну, однако, следует учесть постоянство влияния среды, хорошую изученность распространения излучения, и их возможное нивелирование при обработке сигнала [2, 3].

Разработанная ИИС согласуется со следующими принципами построения:

1. Принцип удаленной обработки сигнала измерения, позволяющий в зависимости от воздействующих факторов обеспечить удаленную обработку сигнала.

2. Принцип адаптивности, позволяющий в зависимости от воздействующих факторов обеспечить перестройку процесса измерения.

3. Принцип реального времени, позволяющий проводить обработку в реальном режиме времени, благодаря физическим возможностям применяемой элементной базы.

4. Принцип обеспечения избыточности измерений, позволяющий повысить точность измерения.

5. Принцип инвариантности измерений, реализуемый путем выполнения других частных принципов: принципа многоканальности или принципа селективной инвариантности, позволяющие повысить функциональность и точность процесса измерения.

Таким, образом, предлагается создание полностью оптической ИИС на основе акустооптических элементов, которая получит такие достоинства полностью оптических сетей, как высокая пропускная способность и высокая защищенность при передаче данных, и при этом будут реализовываться преимущества оптических измерительных устройств.

#### *Список литературы*

1. Султанов А.Х. Виноградова И.Л. Подход к построению коммутаторов оптических сигналов, управляемых оптическим излучением. // Компьютерная оптика. 2004. Т.26. С.56-64.

2. Давыдов А.И., Мухамадиев А.А., Ураксеев М.А. Построение волоконно-оптической распределенной информационно-измерительной системы с акустооптической коммутацией каналов. // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. №1. С.80-83.

3. Давыдов А.И., Мухамадиев А.А., Ураксеев М.А. Акустооптическая коммутация элементов в информационно-измерительных системах. // Датчики и системы. 2013. №2. С.33-37.

М.Е. БЕЛКИН, Д.А. КЛЮШНИК  
*Московский технологический университет (МИРЭА)*

## **ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОННОГО ПОДХОДА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ СВЕРШИРОКОПОЛОСНЫХ РАДИОСИГНАЛОВ**

Проведено сравнительное исследование аналоговых соединительных линий в волоконном и коаксиальном исполнениях. Приведены результаты разработки работающей в С-диапазоне волоконно-оптической аналоговой соединительной линии ДМВ-диапазона.

M.E. BELKIN, D.A. KLYUSHNIK  
*Moscow Technological University (MIREA)*

## **USE OF PHOTONIC APPROACH FOR SUPER-WIDE BANDWIDTH RF SIGNAL INTERCONNECTS CONSTRUCTION**

Comparative analysis for analog interconnect links based on fiber-optic or coaxial cable and the results of the development of C-band fiber-optic analog interconnect link for UHF signal transmission are highlighted.

В комплексных радиоэлектронных средствах существует целый ряд задач по связи двух или нескольких радиочастотных объектов или узлов радиоаппаратуры, находящихся на расстоянии от 10 до 100 и более метров, что осуществляется при помощи аналоговых соединительных линий (АСЛ). В настоящее время они традиционно решаются за счет применения коаксиальных кабелей, однако, благодаря малым потерям в волокне, аналоговая волоконно-оптическая система передачи (АВОСП) [1] тоже может рассматриваться в качестве альтернативного варианта.

Для конкретности сравнения считаем, что коаксиальная АСЛ построена на базе широко распространенного 50-Ом коаксиального кабеля типа RG-401/U, погонные потери в котором согласно паспортным данным составляют 0,12 дБ/м на нижней частоте рассматриваемого ДМВ-диапазона и 0,44 дБ/м на верхней частоте, и оконечного усилителя ZX60-3018G+ фирмы Mini-Circuits, США, компенсирующего потери в кабеле.

Как известно [1], в отличие от цифровой системы передачи важным показателем качества АВОСП в режиме большого сигнала считается динамический диапазон, который рассчитывается на базе измерения



шумов и интермодуляционных искажений. Для проверки полученных результатов анализа, а также в целях сопоставления обеих рассматриваемых АСЛ по динамическому диапазону нами была разработана волоконно-оптическая АСЛ С-диапазона с коэффициентом передачи около 0 дБ во всем ДМВ-диапазоне. Результаты сравнения основных параметров, полученных в ходе измерения волоконно-оптической АСЛ на верхней частоте ДМВ-диапазона, паспортных данных кабеля и усилителя коаксиальной АСЛ и расчета по известным формулам [2], приведены в таблице.

№ п./п	Параметр	Волоконно-оптическая АСЛ	Коаксиальная АСЛ
1	Длина, м	50	50
2	Рабочая полоса частот, ГГц	0,3-3	0,3-3
3	Коэффициент передачи, дБ	0	0
4	Неравномерность коэффициента передачи, дБ	4	17
5	Мощность по уровню 1-дБ компрессии, дБм	9,7	10
6	Точка пересечения 3-го порядка, дБм	21	22
7	Коэффициент шума, дБ	32	26,5
8	Динамический диапазон по компрессии усиления на 1 дБ (CDR), дБ/Гц	152,5	158
9	Динамический диапазон по помехам третьего порядка (SFDR <sub>3</sub> ), дБ/Гц <sup>2/3</sup>	108	114
10	Мощность потребления, мВт	ПОМ: 20 ПРОМ: 420	500

Сравнение показало, что волоконно-оптическая АСЛ конкурентоспособна с традиционной коаксиальной АСЛ уже при передаче радиосигналов дециметрового диапазона. Проигрыш по динамическому диапазону объясняется худшим коэффициентом шума, что в основном определяется применением малоомощного поверхностно излучающего лазера с вертикальным каналом VCSEL [3]. Тем не менее, его использование позволяет значительно уменьшить мощность потребления передающего оптоэлектронного модуля (ПОМ), что важно, например, для бортовых объектов.

#### *Список литературы*

1. Белкин М.Е. Аналоговые волоконно-оптические системы. LAMBERT Academic Publishing, Германия, 2011.
2. Урик В.Д., МакКинни Д.Д., Вильямс К.Д. Основы микроволновой фотоники. М.: Техносфера, 2016.
3. Белкин М.Е., Яковлев В.П. Вискелоника – новое направление оптоэлектронной обработки радиосигналов // Электроника НТБ. 2015. №3. С.92-112.

Е.Ю. ЗЛОКАЗОВ, В.А. НЕБАВСКИЙ, Р.С. СТАРИКОВ  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ  
РАДИОФОТОННОЙ СИСТЕМЫ ВЫБОРКИ  
С ОПТИЧЕСКИМ ДЕМУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕМ  
ПО ДЛИНЕ ВОЛНЫ**

В работе представлены результаты математического моделирования процесса фотонной обработки радиосигналов за счёт дисперсионного растяжения и демультимплексирования по длине волны.

E.Yu. ZLOKAZOV, V.A. NEBAVSKIY, R.S. STARIKOV  
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*

**MATHEMATICAL MODELING OF MICROWAVE PHOTONIC  
SAMPLING WDM SYSTEM**

In this paper results of mathematical modeling of stretching and demultiplexing of a signal in microwave photonic system are presented.

Целью данной работы является моделирование системы обработки сигналов, основанной на процессах растяжения сигнала по времени за счёт дисперсии групповой скорости, а также демультимплексирования по длине волны. Принцип действия системы иллюстрируется рис. 1. Лазер в режиме синхронизации мод генерирует последовательность высокостабильных коротких импульсов, которые после необходимой аттенюации растягиваются за счёт дисперсии так, что спектральные компоненты каждого импульса следуют друг за другом. Далее полученные импульсы модулируются по интенсивности входным радиосигналом при помощи модулятора света (как правило, используется модулятор Маха-Цандера). Полученный оптический сигнал демультимплексируется по длине волны в параллельно работающие каналы, сигнал в каждом из них регистрируется фотодетектором, результат поступает для измерения, например на электронный АЦП. Таким образом, реализация  $N$  каналов обеспечивает пропорциональное повышение скорости обработки, без повышения требований к скорости обработки в каждом канале; подобный принцип используется при построении фотонных АЦП [1-3].

Для моделирования системы создано программное обеспечение, реализующее математические модели её элементов, для которых были введены различные варьируемые параметры, в том числе:

- спектр и шумы лазерного излучения,
- дисперсионные характеристики волоконных элементов,
- модуляционная характеристика модулятора,
- амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) модулятора,
- чувствительность фотодетектора,
- АЧХ фотодетектора,
- шумы фотодетектора,
- АЧХ пропускания каналов демультиплексора

В качестве рабочего оптического диапазона выбран стандартный расширенный 1,5 мкм диапазон, параметры демультиплексирования соответствуют стандарту ITU DWDM.

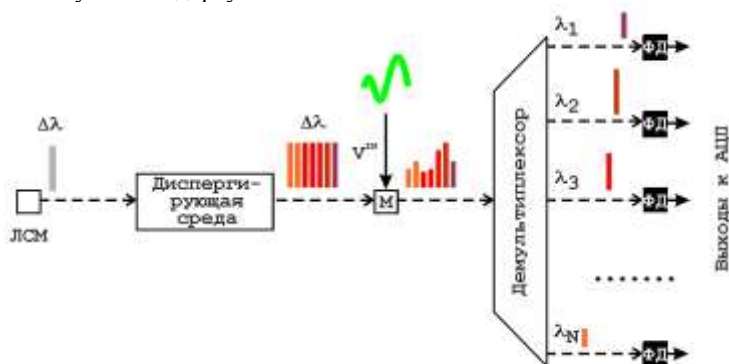


Рис. 1. Схема обработки сигналов в радиофотонной системе:  
ЛСМ - лазер в режиме синхронизации мод, М - модулятор, ФД - фотодиод

Учёт перечисленных параметров позволяет показать их влияние на отношение сигнал/шум, линейность и другие выходные параметры рассматриваемой системы, а значит охарактеризовать её действие.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 14-29-08174.

#### Список литературы

1. Frankel M., Kang J., Esman R. High-performance photonic analogue-digital converter. // Electron. Lett. 1997. v.33. P.2096-2097.
2. Valley G. Photonic analog-to-digital converters. // Opt. Express. 2007. V.15. P.1955-1982.
3. Стариков П.С. Фотонные АЦП. // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. №2. С.3-39.

И.Л. ВИНОГРАДОВА, А.Х. СУЛТАНОВ, А.В. АНДРИАНОВА  
*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА ЧИРПИРОВАНИЯ И ЗАДАЧИ, ВЫПОЛНЯЕМЫЕ УСТРОЙСТВОМ**

Приведены принципы построения устройства чирпирования и усиления оптических сигналов, основанного на применении интерференционного тела (смесителя) и специальным образом выполненных световодных гребёнок. Показан подход к расчету конструктивных параметров устройства. Устройство применяется в системах Radio-over-Fiber для управления радиоизлучением.

I.L. VINOGRADOVA, A.Kh. SULTANOV, A.V. ANDRIANOVA  
*Ufa State Aviation Technical University*

## **PRINCIPLES OF FIBER-OPTIC CHIRPING DEVICES AND FUNCTIONS PERFORMED BY DEVICE**

The principles of the chirp and amplification device construction of optical signals based on the use of the interference body (the mixer) and specially made light guide combs. It shows a constructive approach to the calculation of device options. The device is used in Radio-over-Fiber systems for controlling the radio emission.

Применение устройства чирпирования и усиления оптических сигналов (УЧОИ) в системах RoF обусловлено следующими моментами:

1. УЧОИ обеспечивает компенсацию линейного затухания и хроматической дисперсии;
2. УЧОИ выполняет разделение оптического сигнала для его подведения к радиоизлучателям антенной решетки, а также дифференцированную задержку сигналов, тем самым – выполняет перемещение лепестка радиоизлучения.

УЧОИ интерференционного типа содержит в интерферометр с объемным рабочим телом – смесителем, и специальным образом составленными торцами световодных жгутов – в виде световодных гребёнок [1] (рис. 1), на торцевые плоскости которых нанесено отражающее покрытие. Выделение спектральных полос обеспечивается резонансами, возникающими между идентичными кольцами гребёнок, для чего следует подбирать соответствующие расстояния (интерференционные базы):

$$l_{0,i} = m_{0,i} \frac{\lambda_{0,i}}{n}, \quad (1)$$

где  $m_{0,i}$  – порядки интерференционной картины для каждой из центральных длин волн выделяемых полос  $\lambda_{0,i}$  из подаваемого информационного сигнала,  $i$  – номер выделяемой полосы, а  $n$  – показатель преломления материала смесителя. Дополнительные световоды могут содержать управляемые устройства, выполняющие вариацию показателя преломления (показаны кубиками на рис. 1), управление которыми осуществляется по подводимым к ним световодам  $U_1, U_2, U_3$ . Каждый наблюдаемый резонанс является следствием многолучевой интерференции, возникающей между идентичными кольцами. Интерференция будет конструктивной (т.е. дающей устойчиво наблюдаемый результат), если расстояния  $l_{0,i}$  подобраны из (1). Интерференция лучей, переотражающихся между не идентичными по номерам кольцами также возможна, но она не будет конструктивной. Такой предложенный способ выделения спектральных полос не обеспечит сколь угодно высокой добротности. Вполне достаточно различить  $\lambda_{0,i}$  и  $\lambda_{0,i+1}$ , обеспечив их передачу на различные радиоизлучатели. Чтобы повысить добротность такого многоступенчатого резонатора, можно использовать смеситель со специально подобранным профилем  $n$ .

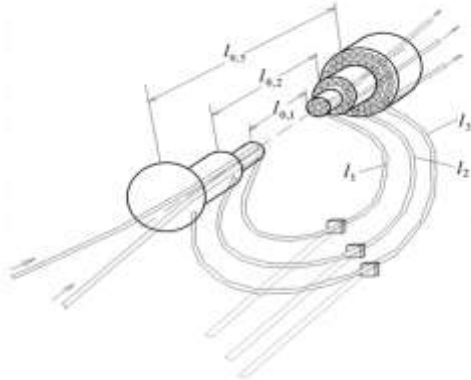


Рис. 1. Схема размещения торцов световодных каналов

#### Список литературы

1. Виноградова И.Л., Андрианова А.В. и др. Устройство для разветвления и чирпирования оптических сигналов. Заявка №2016103991 РФ, МПК G02B 6/28; реш. о выд. пат. 26.05.2016.

А.В. АВЕРЧЕНКО<sup>1</sup>, А.М. ЗОТОВ<sup>1</sup>, П.В. КОРОЛЕНКО<sup>1,2</sup>,  
Н.Н. ПАВЛОВ<sup>1</sup>

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

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

## **ЭСКАЛАЦИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ ВОЛНОВОГО ФРОНТА СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ В ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩИХ ТРАКТАХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Экспериментально и теоретически изучен процесс эскалации плавных возмущений волнового фронта лазерного пучка при его дифракционном распространении. Определены условия образования на волновом фронте винтовых дислокаций. Рассмотрены вопросы инструментального и программного обеспечения фазовых измерений.

A.V. AVERCHENKO<sup>1</sup>, A.M. ZOTOV<sup>1</sup>, P.V. KOROLENKO<sup>1,2</sup>,  
N.N. PAVLOV<sup>1</sup>

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

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

## **THE ESCALATION OF THE WAVEFRONT DISTURBANCES OF THE LIGHT BEAMS IN TRANSMIT AND RECEIVE PATHS OF OPTICAL SYSTEMS**

Experimentally and theoretically the process of escalation of smooth the wavefront perturbations of the laser beam at its diffraction distribution is studied. The conditions of forming of screw dislocations in the wavefront were determined. The questions of instrumental and software phase measurements are considered.

При анализе и оптимизации работы приемопередающих трактов оптических систем (лазерные и информационные системы, системы оптической связи, диагностические и метрологические устройства и т. п.) следует корректно учитывать процессы трансформации волнового фронта световых пучков. Усложнение структуры волнового фронта может приводить к ухудшению работы датчиков фазы и интенсивности, разнообразных интерферометрических и голографических устройств. Возникающие проблемы усугубляются, если на волновом фронте образуются винтовые дислокации. Несмотря на весьма большое количество работ, посвященных изучению винтовых дислокаций (см. например [1-3]), роль дифракции при их формировании в процессах

распространения излучения рассмотрена недостаточно глубоко. В данной работе экспериментально и теоретически рассмотрены особенности дифракционного преобразования волнового фронта пучка после прохождения турбулентной среды. Особое внимание уделено интерферометрическим методам регистрации и анализу условий образования винтовых дислокаций. В экспериментальной части работы использовалась установка, основным элементом которой являлась многопроходная оптическая кювета с турбулентной воздушной массой. Через нее пропускался лазерный пучок на длине волны 0.532 мкм (вторая гармоника неодимового лазера). Амплитудно-фазовый профиль пучка на выходе кюветы определялся с помощью сдвигового интерферометра. Для компьютерной обработки видеоизображений интерферограмм было разработано специальное программное обеспечение, позволяющее восстанавливать волновой фронт, как в присутствии, так и в отсутствии винтовых дислокаций.

В ходе экспериментов было установлено, что в тех случаях, когда на выходе кюветы формировалось излучение с плавными возмущениями волнового фронта в зависимости от величины возмущений в процессе распространения светового пучка поперечное распределение фазы могло приобретать либо дислокационный, либо бездислокационный характер. Винтовые дислокации на волновом фронте образовывались, если стандартное отклонения волнового фронта выходного пучка от фронта плоской волны превышали критическое значение, равное  $\pi/2$ .

Параллельно с постановкой экспериментов, отличающихся уровнем флуктуаций в выходных пучках, на основе численного моделирования осуществлялась проверка их результатов. Результаты данной работы могут оказаться весьма полезными, в частности, для инструментального обеспечения работы приемо-передающих трактов диагностических оптических систем, основанных на просвечивании исследуемых объектов пучками узконаправленного излучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 16-32-00386 мол\_а, 14-02-00461 а).

#### *Список литературы*

1. Berry M.V. Disruption of wavefronts: statistics of dislocation in incoherent Gaussian random waves. // J. Phys. A: Math. Gen. 1978. Vol.11. №1. P.27-37.
2. Арсеньян Т.И., Кауль С.И., Короленко П.В. и др. Дислокации волнового фронта в турбулентной среде. // Радиотехника и электроника. 1992. Т.37. №10. С.1773-1777.
3. Зотов А.М., Короленко П.В., Рыжикова Ю.В. О проблеме восстановления амплитудно-фазового профиля лазерного пучка в турбулентной среде. // Ученые записки физического факультета МГУ. 2016. №3. С.163402-1-163402-3.

Ю.В. ЗАЧИНЯЕВ, С.А. ПЛИВАК, А.С. ШУМИЛИН  
*Южный федеральный университет, Таганрог*

## **ЗАЩИЩЕННАЯ СИСТЕМА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ VLC С ИНТЕРФЕЙСОМ PLC**

Рассмотрен аспект применения технологии VLC с интерфейсом PLC, основанной на использовании видимого оптического излучения. Предложена структурная схема, реализующая передачу данных видимым светом по технологии VLC с интеграцией интерфейса PLC. Обоснована актуальность использования данной технологии при организации защищенной связи.

Yu.V. ZACHINYAEV, S.A. PLIVAK, A.S. SHUMILIN  
*Southern Federal University, Taganrog*

## **SECURED DATA TRANSMISSION SYSTEM BASED ON THE VLC-TECHNOLOGY**

The aspects of the use of VLC technology with PLC interface, based on the use of visible optical radiation. A block diagram for implementing the transfer of technology VLC visible light data with the integration of the PLC interface was suggested. The urgency of the use of this technology in the organization of secure communication was considered.

Использование беспроводных сетей как одной из основных составляющих корпоративной сети является одним из наиболее уязвимых мест для перехвата информации злоумышленниками. Стандартные средства защиты информации, использующие аутентификацию подключаемых абонентов и шифрование данных с развитием вычислительной техники, теряют свою надежность и эффективность.

Одним из путей повышения защищенности передаваемых данных в корпоративных сетях и решения проблем электромагнитной совместимости с радиоборудованием при высоких требованиях к скорости передачи данных и мобильности абонентских устройств видится использование технологии VLC (visible light communication – “передача видимым светом”) с интерфейсом PLC (power line communication – “передача данных по силовым линиям”). Принцип работы такой системы показан на рис. 1.

Использование силовых линий, а не витой пары обуславливается тем, что при правильном расположении комплекса PLC модулей можно



обеспечить достаточную скорость передачи данных и безопасность корпоративной сети, так как съём информации с линии электропитания по мере удаления от самого модема будет практически невозможен.

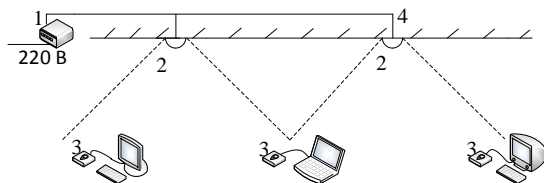


Рис .1. Принцип работы технологии VLC с интерфейсом PLC (1-PLC адаптер; 2-передающее устройство VLC; 3-приемное устройство VLC; 4-силовые линии)

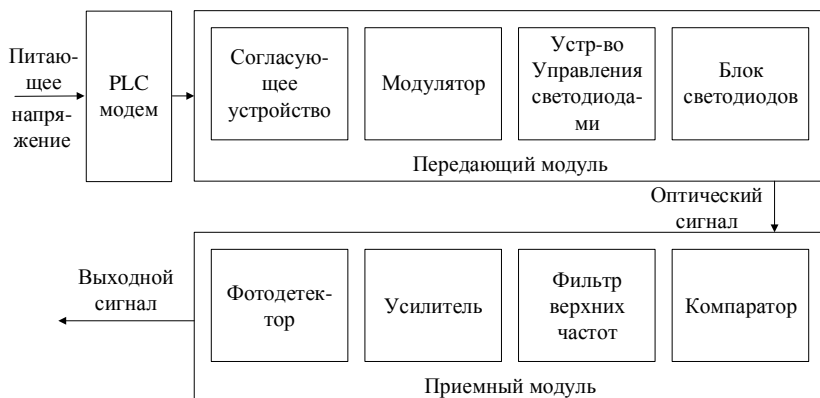


Рис. 2. Структурная схема, реализующая технологию VLC с интерфейсом PLC

PLC модем вносит информационный сигнал в линии электропитания, после чего передающий модуль VLC считывает информацию и преобразует её в оптический сигнал, для дальнейшей передачи по открытому каналу связи. Приемный модуль на абонентском устройстве регистрирует сигнал из помещения.

В данной работе предложена новая архитектура корпоративной сети на основе VLC технологии с использованием интерфейса PLC которая может стать новым, более защищенным способом передачи данных.

#### Список литературы

1. Вакарев М., Безнос О.С. Новая технология беспроводного интернета Li-Fi. // Современные наукоемкие технологии. 2014. №3. С.169-174.
2. Little T. DC, Modeling and designing of a new indoor free space visible light communication system. // MCL Technical Report. No. 08-01-2011.

О.В. БОРЩЕВ, М.С. СКОРОТЕЦКИЙ, Н.М. СУРИН,  
С.А. ПОНОМАРЕНКО

*Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН,  
Москва*

## **НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИЕ ЛЮМИНОФОРЫ КАК НОВЫЙ КЛАСС ОРГАНИЧЕСКИХ ЛЮМИНОФОРОВ**

В докладе отражены последние разработки по синтезу, исследованию и применению новых наноструктурированных кремнийорганических люминофоров (КНЛ), обладающих эффективным внутримолекулярным переносом энергии, высоким квантовым выходом фотолюминесценции, большим псевдо Стоксовским сдвигом и большим молярным коэффициентом экстинкции.

O.V. BORSHCHEV, M.S. SKOROTETSKY, N.M. SURIN,  
S.A. PONOMARENKO

*Enikolopov Institute of Synthetic Polymer Materials of the RAS, Moscow*

## **NANOSTRUCTURED ORGANOSILICON LUMINOPHORES AS A NEW CLASS OF ORGANIC LUMINOPHORES**

The latest developments in the synthesis, study and application of new nanostructured organosilicon luminophores with efficient intramolecular energy transfer, a high photoluminescence quantum yield, a large pseudo-Stokes shift and a huge molar extinction coefficient are reported.

Органические люминофоры широко применяются в ядерной физике, квантовой электронике, люминесцентной дефектоскопии, промышленности пластмасс, биологии и медицине, аналитической химии и т.д. Мы впервые синтезировали новые кремнийорганические наноструктурированные люминофоры (КНЛ), обладающие эффектом «молекулярной антенны» [1, 2]. Этот эффект заключается в способности хромофоров улавливать и безызлучательно передавать энергию по направлению от периферии к ядру, что приводит к эффективному поглощению энергии в широком диапазоне и излучению в узком, более длинноволновом [3, 4]. В КНЛ два типа различных хромофоров соединены через атом кремния, благодаря чему разбивается сопряжение между ними и происходит их фиксация в пространстве на расстоянии

1-2 нм, необходимым для эффективного переноса энергии по механизму Ферстера

Полученные КНЛ обладают рядом преимуществ по сравнению с классическими люминофорами. Во-первых, сложное строение КНЛ обеспечивает поглощение в широком диапазоне спектра и позволяет настраивать его в пределах от 213 до 513 нм. Во-вторых, полученные КНЛ обладают высоким коэффициентом экстинкции, достигающим на некоторых системах  $300000 \text{ M}^{-1}\text{cm}^{-1}$ . В третьих, квантовый выход люминесценции, синтезированных КНЛ достаточно высок и в основном превышает 90%. В четвертых, уникальное строение КНЛ позволяет настраивать спектр люминесценции в широких пределах от 400 до 700 нм. В пятых, разработанные КНЛ обладают более коротким временем люминесценции, по сравнению с классическими люминофорами [5].

Синтезированные КНЛ могут использоваться в высокоэффективных пластмассовых сцинтилляторах [2], фотодетекторах Черенковского излучения [6], органических светоизлучающих диодах, а также в качестве люминесцентных сшивающих агентов для функциональных органосилоксановых полимеров [7] и эффективных смесителей спектров [8, 9]. Коммерциализацией КНЛ занимается компания ООО «ЛюМИнноТех». Все подробности на сайте [www.luminnotech.com](http://www.luminnotech.com).

Работа выполнена при финансовой поддержке, программы Президента РФ для поддержки молодых ученых (МК-364.2017.3).

*Список литературы*

1. Luponosov Yu.N., Ponomarenko S.A., Surin N.M., Borshchev O.V., Shumilkina E.A., Muzafarov A.M. // Chem. Mater. 2009. V.21. P.447-455.
2. Ponomarenko S.A., Surin N.M., Borshchev O.V., et al. // Scientific Reports. 2014. 4. 6549.
3. Боршев О.В., Пономаренко С.А., Клеймяк Е.А., Лупоносов Ю.Н., Сурин Н.М., Музафаров А.М. // Известия Академии наук. Серия химическая. 2010. №4. С.781-789.
4. Polinskaya M.S., Borshchev O.V., Luponosov Yu.N., Surin N.M., Muzafarov A.M., Ponomarenko S.A. // Mendeleev Commun. 2011. 21. 89.
5. Starikova T.Yu., Surin N.M., Borshchev O.V., Pisarev S.A., Svidchenko E.A., Fedorov Yu.V. Ponomarenko S.A. // J. Mater. Chem. C. 2016. 4. 4699.
6. Surin N.M., Borshchev O.V., Ponomarenko S.A., Skorotetsky M.S., Lubsandorzhiiev B., Lubsandorzhiiev N., Pakhorukov A. // NIM A. 2014. V.766. P.160-162.
7. Skorotetsky M.S., Borshchev O.V., Surin N.M., et al. // Silicon. 2015. V.7(2). P.191-200.
8. Akimov D.Yu., Akindinov A.V., Alexandrov I.S., Belov V.A., Borshchev O.V., Burenkov A.A., Danilov M.V., Kovalenko A.G., Luponosov Yu.N., Ponomarenko S.A., Stekhanov V.N., Surin N.M., Zav'yalov S.A., Yablokov M.Yu. // NIM A. 2012. V.695. P.403-406.
9. Jin Y., Aihara H., Borshchev O.V., Epifanov D.A., Ponomarenko S.A., Surin N.M. // NIM A. 2016. V.824. P.691-692.

Н.Н. КУЗЬМИН<sup>1,2</sup>, К.Н. БОЛДЫРЕВ<sup>2</sup>, Е.А. ДОБРЕЦОВА<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Институт спектроскопии РАН, Троицк

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СВОЙСТВ ГАЛЛИЕВЫХ БОРАТОВ СО СТРУКТУРОЙ ХАНТИТА

Кристаллы боратов состава  $RGa_3(BO_3)_4$ , где  $R = Nd, Sm, Er, Ho, Dy$ , были выращены методом спонтанной кристаллизации из раствора в расплаве. Все образцы исследованы методом ИК-спектроскопии. ИК спектры редкоземельных галлиевых боратов отнесены к структуре  $R32$ , хотя местами обнаруживается структура  $C2/c$  (наблюдается в  $Eu$ - и  $Ho$ -боратах). Исследованы спектры люминесценции этих боратов при комнатной температуре и температуре жидкого гелия. Времена затухания люминесценции, которые были получены по наиболее интенсивным переходам, измерены практически для всех соединений боратов. На основе люминесцентных данных и результатов исследования методом оптической спектроскопии в ИК и видимой области определена схема энергетических уровней  $Eu^{3+}$  в  $EuGa_3(BO_3)_4$ . Была выявлена граница поглощения боратов  $RGa_3(BO_3)_4$ , которая находится в УФ части спектра и составляет 300нм.

N.N. KUZMIN<sup>1,2</sup>, K.N. BOLDYREV<sup>2</sup>, E.A. DOBRETSOVA<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Institute for spectroscopy of the RAS, Troitsk

## STUDY OF LUMINESCENT PROPERTIES OF GALLIUM BORATES WITH THE HUNTITE STRUCTURE

Crystals of the rare-earth gallium borates  $RGa_3(BO_3)_4$ , where  $R = Nd, Sm, Er, Ho, Dy$ , were grown by the flux method. All samples were investigated by infrared (IR) spectroscopy technique in a middle and far IR region. IR spectra of rare-earth gallium borates were classified as the  $R32$  structure, but a small amount of the  $C2/c$  structure was found in the  $Eu$ - and  $Ho$ - borates. Luminescence spectra of these borates were investigated at room and liquid helium temperatures. Decay times for the most intense transitions were measured for almost all compounds studied. The scheme of crystal-field energy levels of  $Eu^{3+}$  in  $EuGa_3(BO_3)_4$  was built on the basis of the temperature-dependent optical transmission measurements combined with the luminescence data. The ultraviolet absorption edge of the borates  $RGa_3(BO_3)_4$  was found at 300 nm.

Лазеры, работающие в синем и ультрафиолетовом диапазоне частот, интересны для практического использования. Уменьшение длины волны лазерного излучения может быть полезно при оптической записи информации (более высокая плотность данных), в медицинских целях

(селективность поглощения света), для защиты окружающей среды (разработка дистанционных датчиков). Один из способов получения такого излучения – использование нелинейных кристаллов в качестве генерационной среды лазеров. В таких лазерах происходит самоудвоение и самосмещение частот. Такая же схема конструкции применяется при разработке микролазеров с диодной накачкой, в которой нелинейный кристалл устанавливается на выходном конце лазерного диода, и выполняет роль удвоителя частоты. Хорошо известными представителями кристаллов, обладающих данными свойствами, являются редкоземельные алюминийевые бораты со структурным типом хантита. Такие кристаллы хорошо изучены, и результаты их исследования опубликованы во многих статьях (напр., [1, 2]).

В работе приведены результаты исследований люминесценции галлиевых боратов. На данный момент соединения мало изучены по сравнению с алюминийевыми боратами, которым они изоструктурны. Для боратов  $R\text{Ga}_3(\text{BO}_3)_4$  с редкими землями  $R$  (Nd, Sm, Dy, Er, Ho) получены при криогенной и комнатной температуре и интерпретированы в большом частотном диапазоне спектры пропускания в ИК-диапазоне и люминесценции в широкой спектральной области (средняя ИК – видимая). Измерены времена жизни люминесценции для части соединений. Метод ИК-спектроскопии позволил отнести редкоземельные галлиевые бораты к структуре  $R32$ , хотя для некоторых соединений обнаруживается малая примесь структуры  $C2/c$  (наблюдается в Eu- и Ho-боратах). Была выявлена граница поглощения боратов  $R\text{Ga}_3(\text{BO}_3)_4$ , которая находится в УФ части спектра и составляет 300нм. Полученная информация может быть использована для создания оптических усилителей, лазеров с самосмещением частот и частотных удвоителей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (Грант № 14-12-01033) и стипендии Президента РФ (Е.А.Д., СП-754.2015.1).

#### *Список литературы*

1. Wang P., et al. Highly efficient diode-pumped ytterbium-doped yttrium aluminum borate laser. // Optics communications. 2000. Т.174. №.5. С.467-470.
2. Aleksandrovsky A.S., et al. Upconversion luminescence of  $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4:(\text{Yb}^{3+}, \text{Tm}^{3+})$  crystals. // Journal of Alloys and Compounds. 2010. Т.496. №.1. С.L18-L21.

М.А. КУРОЧКИНА, Е.А. КОНШИНА  
*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **ИЗМЕНЕНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СВОЙСТВ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК CdSe/ZnS В ЖК МАТРИЦЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ**

Были исследованы спектры люминесценции квантовых точек (КТ) CdSe/ZnS с диаметрами ядра 3,5 нм и 5 нм, добавленные в нематический жидкий кристалл. При увеличении напряженности постоянного электрического поля, приложенного к гомогенно-ориентированной ЖК ячейке, наблюдалось вначале возгорание, а затем тушение люминесценции КТ. Обнаружена зависимость интенсивности люминесценции КТ от времени воздействия ультразвука при перемешивании квантовых точек с жидким кристаллом.

М.А. KUROCHKINA, E.A. KONSHINA  
*ITMO University, Saint-Petersburg*

## **LUMINESCENT PROPERTIES VARIATION OF QUANTUM DOTS CdSe / ZnS IN LC MATRIX BY ELECTRIC FIELD**

The luminescence spectra of quantum dots (QDs) CdSe/ZnS with core diameters of 3.5 nm and 5 nm added to the nematic liquid crystals were investigated. The increasing and then the quenching of the QD luminescence were observed by growth of the constant electric field voltage applied to the LC homogeneously-oriented cell. The dependence of the QD luminescence intensity on time of ultrasound exposure on the composite based on quantum dots and liquid crystals was observed.

В настоящее время особый интерес вызывает допирование жидких кристаллов (ЖК) полупроводниковыми квантовыми точками (КТ), которые обладают уникальными оптическими свойствами [1]. Добавление КТ в ЖК матрицу влияет не только на электрооптические свойства жидкого кристалла [2], но и на оптические свойства внедренных нанообъектов [3, 4]. В этой работе приводятся результаты исследований фотолюминесценции (ФЛ) квантовых точек CdSe/ZnS в нематическом жидком кристалле (НЖК) под воздействием внешнего электрического поля и от времени ультразвука при перемешивании композитов с помощью ультразвука.

Исследования проводились с использованием НЖК на основе цианбифенилов и гидрофобных полупроводниковых квантовых точек CdSe/ZnS с диаметрами ядра 3.5 нм и 5 нм. Композиты приготавливались путем добавления навески сухих квантовых точек в жидкий кристалл в нематической фазе и их дальнейшем перемешиванием в ультразвуковой ванне. Концентрации КТ варьировались от 1 вес.% до 10 вес.%. Для исследования использовались ЖК ячейки толщиной от 20 до 30 мкм. Гомогенная ориентация НЖК осуществлялась с помощью натертых полиимидных слоев. Спектрально-люминесцентные свойства КТ в НЖК при приложении постоянного электрического поля исследовались с помощью конфокальной микроскопии.

В спектрах ФЛ КТ CdSe/ZnS в НЖК матрице при увеличении напряженности электрического поля наблюдалось в начале возгорание, а затем тушение ее люминесценции. Однако характер наблюдаемых спектров зависел от времени воздействия ультразвука на НЖК композиты. Было обнаружено, что с увеличением времени воздействия ультразвука на НЖК композит с квантовыми точками от 30 минут до 240 минут увеличивалась площадь агломератов КТ в НЖК. Изменение размеров агломератов КТ наблюдалось и при увеличении напряженности электрического поля. Этому могут способствовать процессы переориентации и течения, происходящие в НЖК. После выключения напряжения наблюдался обратный процесс восстановления интенсивности ФЛ. Однако начальная интенсивность ФЛ не достигалась, что свидетельствует о необратимых изменения в композитах, связанных с агломерацией КТ, которой способствует разрушение оболочки ТОРО.

*Список литературы*

1. Choudhary A., Singh G., Biradar A.M. // Nanoscale. 2014. V.6. P.7743.
2. Konshina E.A., Galin I.F., Shcherbinin D.P., Gavrish E.O. // Liquid Crystals. 2014. V.41. P.1229.
3. Rodarte A.L., Ferri C.G.L., Gray C., Hirst L.S. // Proc. of SPIE. V.8279. P.82790H.
4. Kurochkina M.A., Konshina E.A. // Opt. and Spectr. 2015. V.118. P.111.

Ю.А. СТРОКОВА, С.Е. СВЯХОВСКИЙ, А.М. САЛЕЦКИЙ  
*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

## **КИНЕТИКА ТУШЕНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ МОЛЕКУЛ ДОНОРА В ОДНОМЕРНОМ ФОТОННОМ КРИСТАЛЛЕ НА ОСНОВЕ ОКИСЛЕННОГО ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ**

Экспериментально изучена кинетика люминесценции молекул донора Кумарина 7 в одномерных ФК на основе окисленного мезопористого кремния в отсутствие и в присутствии молекул акцептора Родамина Б. Получены зависимости времени жизни Кумарина 7 от угла детектирования люминесценции, длины волны и концентрации акцептора.

Yu.A. STROKOVA, S.E. SVYAKHOVSKIY, A.M. SALETSKY  
*Lomonosov Moscow State University*

## **LUMINESCENCE DECAY KINETICS OF DONOR MOLECULES IN ONE-DIMENSIONAL ANNEALED POROUS SILICON PHOTONIC CRYSTAL**

Luminescence kinetics of molecules of donor Coumarin 7 in a one-dimensional annealed mesoporous silicon photonic crystal in the absence and in the presence of molecules of acceptor Rhodamine B has been investigated experimentally. Coumarin 7 lifetime dependences on a luminescence detection angle, wavelength and acceptor concentration are obtained.

Фотонные кристаллы (ФК) благодаря наличию фотонной запрещенной зоны (ФЗЗ) предоставляют широкие возможности для модифицирования спектров излучения внедренных в них люминофоров и интересны также с точки зрения увеличения эффективности переноса энергии электронного возбуждения (ПЭЭВ) в многокомпонентных люминесцирующих системах [1-3].

Для названных выше применений одномерные ФК на основе окисленного мезопористого кремния обладают важными преимуществами: они могут служить матрицей практически для любых люминофоров: органических красителей, полупроводниковых квантовых точек, полимеров; имеют ФЗЗ в видимой области, положение которой можно регулировать параметрами изготовления; обладают большой удельной поверхностью.



Одномерные ФК на основе окисленного пористого кремния характеризуются слабым изменением показателя преломления слоев и имеют фотонную псевдозапрещенную зону, положение которой меняется в зависимости от угла отражения света. Такая зависимость определяет различную плотность фотонных мод доступных для излучения молекулами красителя, спектр люминесценции которых перекрывается с ФЗЗ. Это приводит к анизотропному пространственному и спектральному распределению люминесценции молекул красителя [2].

В работе [4] показано, что изменение плотности фотонных мод (ФМ) влияет на эффективность ПЭЭВ в донор-акцепторной паре красителей, но не влияет на его скорость. Зависимость плотности ФМ от направления излучения люминесценции в одномерных ФК, описанная выше, позволяет проверить это утверждение, исследуя скорость ПЭЭВ между молекулами донора и акцептора, адсорбированными в образцы ФК на основе пористого кремния.

В данной работе представлены результаты исследования ПЭЭВ между молекулами Кумарина 7 (К7, донор) и Родамина Б (РБ, акцептор) в ФК на основе экспериментального исследования кинетики люминесценции К7 и кинетики тушения люминесценции К7 в присутствии РБ. Образцы ФК изготовлялись по методике, описанной в [5]. Полученные зависимости времени жизни К7 от угла детектирования, спектрального диапазона и концентрации акцептора позволяют судить об эффективности и скорости ПЭЭВ между красителями.

#### *Список литературы*

1. Строкова Ю.А., Свяховский С.Е., Салецкий А.М. // 5-ая международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2016.
2. Строкова Ю.А. // XXIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам "Ломоносов-2016". Секция "Физика". Сборник тезисов. Т. 1. Москва, 2016.
3. Kedia S., Sinha S. // Optics Communications. 2015. V.339. P.41-46.
4. Blum C., Zijlstra N., Lagendijk A., et al. // Phys. Rev. Lett. 2012. V.109. P.203601.
5. Svyakhovskiy S.E., Maydykovskiy A.I., Murzina T.V. // Journal of Applied Physics. 2012. V.112. P.013106.

В.М. КОРШУНОВ<sup>1,2</sup>, С.А. АМБРОЗЕВИЧ<sup>1,2</sup>, И.В. ТАЙДАКОВ<sup>2</sup>,  
А.Г. ВИТУХНОВСКИЙ<sup>2,3</sup>

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

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

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

## ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ $\beta$ -ДИКЕТОНАТОВ СКАНДИЯ (III)

Представлены результаты спектроскопических исследований 4 металлоорганических соединений иона Sc (III) с лигандами из класса  $\beta$  – дикетонатов. Показано, что связывание лигандов с оптически пассивным ионом Sc (III) приводит к сенсбилизации их люминесценции, а также отражается на спектрах оптического поглощения. Кинетические измерения люминесценции выявили неэкспоненциальный характер ее релаксации. Данные о кинетических характеристиках с пространственным разрешением по времени релаксации и интенсивности позволили сделать вывод о количестве центров люминесценции для исследованных комплексов.

V.M. KORSHUNOV<sup>1,2</sup>, S.A. AMBROZEVICH<sup>1,2</sup>, I.V. TAIDAKOV<sup>2</sup>,  
A.G. VITUKHNOVSKY<sup>2,3</sup>

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

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

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

## LUMINESCENT PROPERTIES OF $\beta$ -DIKETONATES OF SCANDIUM (III)

We present an experimental study of 4 metal-organic complexes of scandium(III). It was demonstrated that bonding of the optically passive Sc ion and  $\beta$ -diketonate ligands sensitizes luminescence of the complex and affect the luminescence spectra. Luminescence decays of the complexes have non-exponential behavior. To estimate the number of different types of luminescent sites in the complexes we carried out of spatially resolved luminescence decay experiments by means of confocal microscope.

В настоящей работе были проведены исследования оптических свойств нового класса люминофоров на основе комплексов – дикетонатов Sc(III) [1], люминесцирующих в широком спектральном диапазоне. В качестве объектов исследования были выбраны соединения tris-(1,3-bis(1-methyl-1H-pyrazol-3-yl)propane-1,3-dionato) scandium (III), tris-(1,3-bis(1,3-

dimethyl-1H-pyrazol-4-yl)propane-1,3-dionato) scandium (III), tris-(1,3-bis(1-methyl-1H-pyrazol-5-yl)propane-1,3-dionato) scandium (III) и tris-(1-(1,3-dimethyl-1H-pyrazol-4-yl)-4,4,4-trifluorobutane-1,3-dionato) scandium (III) [2]. Понимание механизмов релаксации возбуждения в таких комплексах позволит повысить эффективность как самих люминофоров, так и источников света на их основе [3].

Для всех исследованных комплексов было экспериментально показано, что при связывании  $\beta$ -дикетонатных лигандов с ионом Sc(III) происходит активация их люминесценции, тогда как для растворов чистых лигандов их люминесценция не наблюдается. Сравнение спектров оптического поглощения растворов комплексов и лигандов, взятых в отдельности, показало, что добавление иона Sc(III) изменяет спектры поглощения лигандов. Для выбранных комплексов были измерены кинетики люминесценции и получены пространственные распределения времен релаксации. Для вещества 3 tris-(1,3-bis(1-methyl-1H-pyrazol-3-yl)propane-1,3-dionato) scandium (III) были сделаны выводы, что для него характерны два типа излучающих центров, люминесцирующих в полосах 430 и 450 нм с временами релаксации = 1.67 нс и = 3.2 нс соответственно и равномерно распределенных по объему образца. У образца tris-(1-(1,3-dimethyl-1H-pyrazol-4-yl)-4,4,4-trifluorobutane-1,3-dionato) scandium (III) нами обнаружен лишь один тип центров люминесценции с временами релаксации = 0.9 нс и = 1.9 нс. Обнаружено отличие времен релаксации люминесценции на гранях кристаллитов от времен релаксации в объеме.

#### *Список литературы*

1. Savchenko A.I., Bereznytska S.A., Ivakha B.N., Trunova K.E. // Springer International Publishing, Cham, 2015. P.85-94.
2. Taydakov I.V., Akkuzina A.A., Avetisov R.I., Khomyakov A.V., Saifutyarov R.R., Avetisov I.C. // Journal of Luminescenc. 2016. V.177. P.31-39.
3. Aguiar F.P., Costa I.F., Espnola J.G.P., Faustino W.M., Moura J.L., Brito H.F., Paolini T.B., Felinto M.C.F., Teotonio E.E. // Journal of Luminescence. 2016. V.170. P.538-546.

М.Т. МЕТЛИН<sup>1</sup>, С.А. АМБРОЗЕВИЧ<sup>1,2</sup>, Д.А. МЕТЛИНА<sup>1</sup>,  
И.В. ТАЙДАКОВ<sup>1</sup>, А.Г. ВИТУХНОВСКИЙ<sup>1,3</sup>

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

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

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

## ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ПИРАЗОЛСОДЕРЖАЩЕГО 1,3-ДИКЕТОНАТНОГО КОМПЛЕКСА Pr (III) С 1,10-ФЕНАНТРОЛИНОМ

В работе изучены люминесцентные свойства пиразолсодержащего 1,3-дикетонатного комплекса Pr(III) с 1,10-фенантролином. В комплексе наблюдается так называемый «антенный» эффект, благодаря которому происходит передача возбуждения с лигандного окружения на редкоземельный ион. С помощью спектроскопических измерений удалось установить структуру уровней и переходы, принимающие участие в люминесценции.

M.T. METLIN<sup>1</sup>, S.A. AMBROZEVICH<sup>1,2</sup>, D.A. METLINA<sup>1</sup>,  
I.V. TAYDAKOV<sup>1</sup>, A.G. VITUKHNOVSKY<sup>1,3</sup>

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

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

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

## LUMINESCENCE OF PYRAZOLIC 1,3-DIKETONE Pr(III) COMPLEXES WITH 1,10-PHENANTHROLINE

We studied luminescence properties of pyrazolic 1,3-diketone Pr(III) complex with 1,10-phenanthroline ligand environment. The complex was demonstrated to possess so-called “antenna” effect when the optically excited ligands pass their excitation to the rare earth ion. The spectroscopic measurements revealed a complicated structure of luminescence spectrum of the complex. The data obtained enabled us to identify transitions taking place in luminescent ion and to reveal its energy diagram.

Комплексы лантанидов с различными органическими лигандами зачастую обладают интересными люминесцентными свойствами, что связано с так называемым «антенным эффектом», сущность которого заключается в поглощении возбуждающего излучения органической частью молекулы и последующей передаче энергии на центральный ион [1-3]. Благодаря этому эффекту удается решить проблему малого сечения

поглощения свободных ионов Ln(III) и многократно увеличить интенсивность люминесценции.

Известно, что при дизайне комплексов, обладающих хорошими люминесцентными свойствами, следует избегать включения во внутреннюю сферу комплекса молекул гидроксилсодержащих растворителей, поскольку они могут эффективно тушить люминесценцию за счет процессов мультифононной релаксации на ОН-осцилляторах. Одним из известных методов, позволяющих удалить такие молекулы, является введение в структуру комплексов дополнительных лигандов, например бидентатных третичных аминов (2,2-бипиридила или 1,10-фенантролина). Дополнительные лиганды также могут выступать в роли антенн, увеличивающих эффективность преобразования энергии [4].

Целью данной работы был синтез и исследование люминесцентных свойств комплексных соединений Pr(III) с новым классом лигандов – 1,3-дикетонами, содержащими пиразольный фрагмент, в частности с 1,3-бис-(1,3-диметил-1H-пиразол-4-ил)1,3-пропандионом. Полученные соединения могут представлять интерес для создания эмиссионных и вспомогательных слоев в различных оптоэлектронных устройствах.

В спектре фотолюминесценции комплекса наблюдаются переходы  $1D_2 \rightarrow 3H_2$  (595 нм),  $1D_2 \rightarrow 3H_3$  (605 нм),  $1D_2 \rightarrow 3H_4$  (610 нм),  $1G_6 \rightarrow 3H_6$  (618 нм),  $3P_1 \rightarrow 3H_6$  (622 нм),  $3P_0 \rightarrow 3H_6$  (630 нм),  $3P_1 \rightarrow 3F_2$  (648 нм),  $3P_0 \rightarrow 3F_2$  (651 нм). Наиболее интенсивная полоса люминесценции комплекса лежит в области 605 нм, что соответствует переходу  $1D_2 \rightarrow 3H_3$ . Кинетические зависимости в выделенных полосах спектра люминесценции комплексного соединения празеодима(III) состояли из двух экспоненциальных процессов с временами 2.3 и 80 нс. С уменьшением длины волны регистрации люминесценции комплекса от 610 до 510 нм наблюдается уменьшение амплитуды компоненты с большим временем релаксации и рост амплитуды компоненты с коротким временем релаксации. Такое же поведение наблюдается и при увеличении регистрируемой длины люминесценции от 610 до 650 нм. В области 610 нм компонента с более продолжительным временем релаксации дает максимальный вклад.

#### *Список литературы*

1. Binnemans K., Rareearth betadiketonates // in Handbook of the Physics and Chemistry of Rareearths. Elsevier, New York, 2005. 35. 107.
2. Eliseeva S.V., Bünzli J.C.G. // Chem. Soc. Rev. 2010. V.39. P.189.
3. Binnemans K. // Chem. Rev. 2009. V.109. P.4283.
4. Eliseeva S.V., Bünzli J.C.G. Basics of Lanthanide Photophysics // in Lanthanide Luminescence. Springer, Berlin, 2011. 7. 1.

М.А. БУХАРИН<sup>1,2</sup>, Н.Н. СКРЯБИН<sup>1,2</sup>, Д.В. ХУДЯКОВ<sup>2,3</sup>,  
С.К. ВАРТАПЕТОВ<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>*ООО «Оптосистемы», Москва*

<sup>3</sup>*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

## **АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПЕРМАНЕНТНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В КУМУЛЯТИВНОМ РЕЖИМЕ**

Проведено численное моделирование зависимости температуры в фокальном пятне от времени экспозиции для различных частот следования импульсов (от нетеплового режима при 0.1 МГц до теплового кумулятивного при 10 МГц), а также предложено описание фотохимических и тепловых процессов, приводящих к изменению показателя преломления. Приведено сравнение численных результатов с моделями других авторов и с экспериментальными значениями.

M.A. BUKHARIN<sup>1,2</sup>, N.N. SKRYABIN<sup>1,2</sup>, D.V. KHUDYAKOV<sup>2,3</sup>,  
S.K. VARTAPETOV<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>*Optosystems Ltd., Moscow*

<sup>3</sup>*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*

## **ANALYSIS OF THERMAL PROCESSES OF PERMANENT REFRACTIVE INDEX CHANGE UNDER THE INFLUENCE OF FEMTOSECOND EMISSION IN CUMULATIVE REGIME**

Numerical modelling of temperature distribution in focal region as a function of exposition time was carried out for different pulse repetition rates (from nonthermal regime at 0.1 MHz to thermal cumulative one at 10 MHz). Description of photochemical and thermal processes was proposed on the base of obtained numerical results, which were also compared with experimental results and previously published models.

Под действием сильно сфокусированного фемтосекундного лазерного излучения в оптически прозрачных средах может наблюдаться эффект перманентного изменения показателя преломления [1]. Он может быть использован для создания трехмерных структур в целях интегральной оптики [2]. Для повышения величины перманентно индуцируемого

показателя преломления используется тепловой кумулятивный режим записи [3, 4]. При этом для анализа структуры получаемых треков и разделения вкладов конкурирующих фотохимических и тепловых процессов, приводящих к изменению показателя преломления материала, необходима оценка распределения температуры в фокальном пятне.

В настоящей работе представлена новая численная модель теплового воздействия фемтосекундных лазерных импульсов на материал и проведено численное моделирование зависимости температуры в фокальном пятне от времени экспозиции для различных частот следования импульсов (от нетеплового режима при 0.1 МГц до теплового кумулятивного при 10 МГц). Приведено сравнение численных результатов с моделями других авторов и с экспериментально полученными значениями перманентно индуцированного показателя преломления. В работе впервые рассматривается вопрос повышения скорости протекания фотохимических процессов с повышением температуры в фокальном пятне при фемтосекундной записи оптических волноводов.

Актуальность результатов заключается в том, что модель основана на экспериментально измеренных значениях коэффициента поглощения для каждой пары параметров записи {энергия в импульсе; частота следования импульсов} и анализе экспериментально полученной структуры индуцированных треков для фундаментальной длины волны (1.04 мкм) коммерчески доступных высокомоощных фемтосекундных лазеров с высокой частотой следования импульсов (до 10 МГц), что открывает новые перспективы для технологии фемтосекундной записи оптических интегральных устройств.

#### *Список литературы*

1. Femtosecond Laser Micromachining /ed. by R. Osellame, R. Ramponi, G. Cerullo. London: Springer-Verlag, 2012.
2. Gattass R.R., Mazur E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials. // Nature Photonics. 2008. V.2. P.219-225.
3. Eaton S.M., et al. High refractive index contrast in fused silica waveguides by tightly focused, high-repetition rate femtosecond laser. // J. Non-Cryst. Sol. 2011. 357. 2387.
4. Bukharin M.A., et al. Heat accumulation regime of femtosecond laser writing in fused silica and Ndphosphate glass. // App. Phys. A. 2015. 119(1). P.397-403.

К.Н. БОЛДЫРЕВ, М.Н. ПОПОВА  
*Институт спектроскопии РАН, Троицк*

## СВЕРХТОНКАЯ СТРУКТУРА В СПЕКТРАХ КРИСТАЛЛА $\text{LiYF}_4:\text{Ho}^{3+}$ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Данная работа посвящена первому низкотемпературному оптическому исследованию с высоким спектральным разрешением монокристалла  $\text{LiYF}_4:\text{Ho}$ , помещенного во внешнее магнитное поле. Проведено исследование изменения сверхтонкой структуры спектральных линий гольмия в магнитных полях  $\mathbf{H}\parallel c$  и  $\mathbf{H}\perp c$ . Обсуждаются перенормировка интервалов сверхтонкой структуры и перераспределение интенсивностей из-за недиагональных зеемановского и магнитного сверхтонкого взаимодействий. Обнаружен ряд интересных эффектов, ранее предсказанных теоретически. Данные исследования представляют интерес для применений в оптической квантовой памяти.

K.N. BOLDYREV, M.N. POPOVA  
*Institute for spectroscopy of the RAS, Troitsk*

## HYPERFINE STRUCTURE IN THE SPECTRA OF $\text{LiYF}_4:\text{Ho}^{3+}$ IN AN EXTERNAL MAGNETIC FIELD

This work is devoted to the first investigation of the low-temperature high-resolution optical spectra of  $\text{LiYF}_4:\text{Ho}$  in an external magnetic field. A field-dependent transformation of the hyperfine structure of holmium spectral lines is studied for the cases  $\mathbf{H}\parallel c$  and  $\mathbf{H}\perp c$ . We discuss a renormalization of the hyperfine energy intervals and redistribution of intensities in the spectrum caused by nondiagonal Zeeman and magnetic hyperfine interactions. Some new optical effects were found. These investigations are interesting for optical quantum memory applications.

Спектры кристаллов  $\text{LiYF}_4$ , легированных редкоземельными ионами, демонстрируют исключительно узкие линии, что дает возможность наблюдать очень тонкие эффекты. В частности, для кристаллов  $\text{LiYF}_4:\text{Ho}$  ранее были обнаружены и исследованы сверхтонкая структура (СТС) линий за счет взаимодействия между  $4f$  электронами иона  $\text{Ho}^{3+}$  и ядерными моментами ядра гольмия [1-3] и изотопические эффекты [4]. Спектры кристалла  $\text{LiYF}_4:\text{Ho}$  во внешнем магнитном поле, по нашим сведениям, еще не изучались. В этой работе исследован спектр монокристалла, обогащенного изотопом лития  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^7\text{Li}_{0.1}{}^6\text{Li}_{0.9}\text{YF}_4:\text{Ho}$  (0,1 ат.%) в постоянных магнитных полях  $\mathbf{H}\parallel c$  и  $\mathbf{H}\perp c$  ( $H = 0.6$  и  $0.9$  Т),



в поляризованном свете, распространяющемся как вдоль оси  $c$  тетрагонального кристалла  $\text{LiYF}_4$  ( $\alpha$ -поляризация), так и перпендикулярно ей ( $\sigma$ - и  $\pi$ - поляризации).

В оптических спектрах, разрешенных в электродипольном приближении, нами ясно наблюдалась дополнительная структура в сверхтонких компонентах, что связано с изотопическим беспорядком в подрешетке лития [4]. Каждая из восьми сверхтонких компонент двукратно вырождена в нулевом магнитном поле [1, 2]. Магнитное поле расщепляет состояние  $\Gamma_{34}$ , что, в свою очередь, вызывает расщепление спектральной линии. Интересно отметить, что интенсивности низкочастотных сверхтонких компонент выше, чем высокочастотных, в то время как интервалы уменьшаются при понижении частоты. Причина этого заключается в том, что низкочастотная компонента расщепленного в магнитном поле уровня  $\Gamma_{34}$  сближается с ниже лежащими синглетными уровнями ( $\Gamma_2$ ) и ( $\Gamma_1$ ), что усиливает смешивание волновых функций. Кроме того, было обнаружено, что переход  $\Gamma_2(^5I_8) \rightarrow \Gamma_{34}(^5I_7)$  заимствует свою интенсивность из переходов  $\Gamma_2(^5I_8) \rightarrow \Gamma_2$ ,  $\Gamma_1(^5I_7)$ , тем больше, чем ближе заданный сверхтонкий подуровень уровня  $\Gamma_{34}(^5I_7)$  к уровням  $\Gamma_2$ ,  $\Gamma_1(^5I_7)$ . В свою очередь, запрещенные в  $\alpha$ -поляризации переходы  $\Gamma_2(^5I_8) \rightarrow \Gamma_2$ ,  $\Gamma_1(^5I_7)$  возгораются в магнитном поле из-за усиления смешивания волновых функций начального уровня перехода  $\Gamma_2(^5I_8)$ , отстоящего от основного уровня  $\Gamma_{34}$  всего на  $6.8 \text{ см}^{-1}$  при  $H = 0$ , и верхней компоненты расщепленного в магнитном поле основного уровня.

Взаимодействие между штарковскими уровнями, которое усиливается в магнитном поле, проявляется также в неравенстве интервалов СТС в высокочастотной и низкочастотной компонентах расщепленной в магнитном поле спектральной линии, а также в появлении и/или росте интенсивностей запрещенных линий с  $\Delta m = \pm 1$  (где  $m$  – проекция ядерного спина).

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Президента РФ для молодых ученых-кандидатов наук.

#### *Список литературы*

1. Agladze N.I., Popova M.N. // Solid State Comm. 1985. V.55. P.1097.
2. Агладзе Н.И., Виноградов Е.А., Попова М.Н. // ЖЭТФ. 1986. Т.91. С.1210.
3. Popova M.N., Agladze N.I. // Molecular physics. 2004. V.102. P.1377.
4. Agladze N.I., Popova M.N., Zhizhin G.N., Egorov V.J., Petrova M.A. // Phys. Rev. Lett. 1991. V.66. P.477.

Е.В. ОСИПОВ, А.А. БЕЛОГОРЛОВ, Д.С. ДОВЖЕНКО,  
И.Л. МАРТЫНОВ, А.А. ЧИСТЯКОВ  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **НОВЫЙ СПОСОБ ВНЕДРЕНИЯ СОПРЯЖЕННЫХ ПОЛИМЕРОВ В ФОТОННЫЕ СТРУКТУРЫ ИЗ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ**

В работе исследовался новый способ внедрения сопряженных полимеров вида MDMO-PPV и Polyfluorene в фотонные структуры под действием давления. В качестве фотонных структур использовались несимметричные микрорезонаторы из пористого кремния. На основании модификации спектров фотолюминесценции выбранных полимеров продемонстрирована эффективность предложенного метода внедрения.

E.V. OSIPOV, A.A. BELOGORLOV, D.S. DOVZHENKO,  
I.L. MARTYNOV, A.A. CHISTYAKOV  
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*

## **A NEW METHOD OF EMBEDDING OF CONJUGATED POLYMERS INTO POROUS SILICON PHOTONIC STRUCTURES**

We have investigated a new method of embedding of conjugated polymers (MDMO-PPV and Polyfluorene) into porous photonic structures using high pressure. Porous silicon microcavity was used as a typical porous photonic structure. We have proved the effectiveness of the proposed embedding method relying on the significant modification of the photo luminescence spectra.

В настоящее время сопряженные полимеры активно применяются в области светодиодных и фотовольтаических устройств [1, 2]. Особый интерес представляет использование данного класса полимеров и гибридных структур на их основе в качестве детекторов органических молекул в воздухе. Это возможно благодаря эффекту деградации люминесценции при фотоиндуцированном переносе электрона с возбужденной молекулярной орбитали полимера (НОМО) на молекулярную орбиталь нитроароматических соединений. В работе [3] данный эффект продемонстрирован на примере тушения люминесценции полимера МЕН-PPV, внедренного в фотонные кристаллы (ФК) из пористого кремния (ПК). Особое внимание исследователи уделяют

влиянию на модификацию спектра фотолюминесценции в зависимости от распределения полимера внутри структуры ФК. Эффективное проникновение полимера характеризуется узкой линией в спектре фотолюминесценции с шириной на полувысоте соответствующей моде микрорезонатора. Стоит отметить, что данный эффект позволит в перспективе упростить оптическую схему детекции и повысить чувствительность сенсора. Таким образом усовершенствование механизма внедрения полимеров в фотонные кристаллы является важной задачей.

В настоящей работе использовались два полимера принадлежащие к классу сопряженных: MDMO-PPV и polyfluorene (PF), которые имеют высокий квантовый выход люминесценции. Оба выбранных полимера чувствительны к нитроароматическим соединениям, в особенности PF благодаря относительно высокому положению уровня НОМО.

Выбранные полимеры внедрялись в микрорезонаторы, состоящие из периодически чередующихся слоев низкой и высокой пористости, полученные путем электрохимического травления высоколегированного монокристаллического кремния в растворе плавиковой кислоты. Для большей эффективности внедрения полимеров первый слой микрорезонатора был изготовлен с низкой пористостью [3, 4], а средний диаметр пор слоя высокой пористости был выбран предельно возможным для данного типа кремния.

При внедрении полимеров использовались два метода: нанесение на поверхность микрорезонатора при нормальных условиях и при повышенных давлениях в диапазоне 3-5 атмосфер. Эффективность проникновения полимера внутрь структуры оценивалась по модификации спектра фотолюминесценции полимера. Продемонстрировано, что способ внедрения полимеров при повышенном давлении значительно увеличивает процент образцов с прокинувшими MDMO-PPV и PF в резонансный слой фотонной структуры.

Исследования выполнены при поддержке гранта Президента Российской Федерации (№ МК-4937.2016.2).

#### *Список литературы*

1. Günes S., Neugebauer H., Sariciftci N.S. Conjugated Polymer-Based Organic Solar Cells. // Chem. Rev. 2007. V.107. №4. P.1324-1338.
2. AlSalhi M.S., et al. Recent Advances in Conjugated Polymers for Light Emitting Devices. // Int. J. Mol. Sci. 2011. V.12, №12. P.2036-2054.
3. Tokranova N.A., et al. Deep Infiltration of Emissive Polymers into Mesoporous Silicon Microcavities: Nanoscale Confinement and Advanced Vapor Sensing // J. Phys. Chem. C. 2013. V.117. №44. P.22667-22676.
4. Dovzhenko D.S., et al. Porous Silicon Microcavity Modulates the Photoluminescence Spectra of Organic Polymers and Quantum Dots. // Mater. Today Proc. 2016. V.3. №2. P.485-490.

А.Д. ГАРТМАН, А.И. МАЙДЫКОВСКИЙ, С.Е. СВЯХОВСКИЙ,  
Н.В. МИТЕТЕЛО, С.А. ЕВЛАШИН, Т.В. МУРЗИНА  
*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

## **ДВУХФОТОННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ В КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ГРАФЕНА И ОКСИДА ГРАФЕНА С НАНОЧАСТИЦАМИ СЕРЕБРА**

Исследование нелинейного поглощения образцов на основе оксида графена и оксида графена с наночастицами серебра вблизи плазмонного резонанса методом безапертурного Z-сканирования. В экспериментальных зависимостях наблюдается усиление нелинейного коэффициента поглощения в образцах с большей концентрацией частиц серебра.

A.D. GARTMAN, A.I. MAYDYKOVSKIY, S.E. SVYAKHOVSKIY,  
N.V. MITETELO, S.A. EVLASHIN, T.V. MURZINA  
*Lomonosov Moscow State University*

## **TWO-PHOTON ABSORPTION IN GRAPHENE OXIDE/SILVER NANOPARTICLES COMPOSITE MATERIAL**

Single-beam open aperture z-scan technique was used to determine two-photon absorption coefficient of solvent—produced graphene oxide (GO) film decorated with silver nanoparticles (AgNP) in the spectral vicinity of the plasmon resonance.

Оксид графена представляет собой новый двумерный углеродный материал, который привлекает значительный интерес в последние годы в связи с его перестраиваемыми электронными и оптическими свойствами [1], что делает его перспективным материалом для создания новых электронных и оптико-электронных приборов. Недавно было показано, что оксид графена в суспензии обладает высокими оптическими свойствами, которые могут быть улучшены путем комбинации оксида графена с наночастицами благородных металлов, обладающих локальными поверхностными плазмонными резонансами.

Экспериментальные образцы раствора на основе оксида графена были изготовлены модифицированным методом Хаммерса из высококачественного пиролитического графита. Раствор оксида графена смешивался с наночастицами серебра нужной концентрацией и методом спин-коутинга наносился на стеклянную подложку для формирования тонкой пленки толщиной около 14 нм.

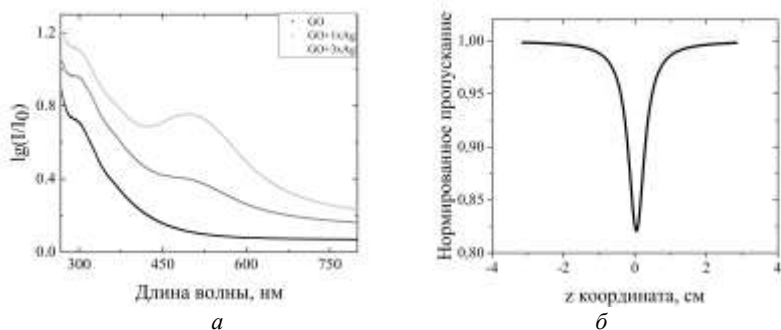


Рис. 1. Линейные спектры поглощения образцов GO и GO+AgNP с разной концентрацией наночастиц серебра(а), типичная зависимость z-скана образца GO+AgNP при  $\lambda = 800$   $I_0=4.2$  МВт/см<sup>2</sup> (б)

Линейные спектры поглощения всех экспериментальных образцов (рис. 1а) показывают устойчивый рост поглощения в сторону УФ-диапазона. Видно, что добавление плазмонных наночастиц серебра приводит к выраженному увеличению поглощения в диапазоне 410-600 нм.

На рис. 1б представлена типичная зависимость безапертурного z-скана [3] для образцов на основе оксида графена с наночастицами серебра, измеренная титан-сапфировым лазером при длине волны 800 нм. Наблюдаемый эффект имеет порядок 15%, благодаря двухфотонному поглощению. На основе анализа подобных зависимостей была проведена оценка коэффициента нелинейного поглощения, значение которого составило  $\beta=0,7 \times 10^{-6}$  см/Вт, в то время как для чистого оксида графена коэффициент нелинейного поглощения –  $\beta=6,4 \times 10^{-8}$  см/Вт, т.е. наблюдается выраженное увеличение нелинейного поглощения.

Высокие значения коэффициентов нелинейности третьего порядка подтверждают, что исследуемые композитные плазмонные структуры, являются перспективными для дальнейших исследований в нелинейной плазмонике.

#### Список литературы

1. Loh K. P. , Bao Q., Eda G., Chhowalla M. Graphene oxide as a chemically tunable platform for optical applications. // Nature Chemistry. 2010. V.2. P.1015-1024.
2. Sheik-Bahae M., Said A.A., Wei T.H., Hagan D.J., Van Stryland E. W. Sensitive measurement of optical nonlinearities using a single beam. // IEEE Journal of Quantum Electronics. 1990. V.26(4). P.760-769.

А.В. ХАРИТОНОВ<sup>1,2</sup>, С.С. ХАРИНЦЕВ<sup>1,2</sup>, А.И. ФИШМАН<sup>1</sup>,  
М.Х. САЛАХОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Казанский федеральный университет*

<sup>2</sup>*Институт перспективных исследований АН Республики Татарстан, Казань*

## **ГЕНЕРАЦИЯ СИГНАЛА ВЫНУЖДЕННОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА В ПЛАЗМОННОМ МИКРОРЕЗОНАТОРЕ ФАБРИ-ПЕРО ИЗ НИТРИДА ТИТАНА**

В данной работе исследуется вынужденное комбинационное рассеяние поверхностных плазмонных волн в нитриде титана. Показано, что в основе полученного эффекта лежит нелинейное взаимодействие плазмона накачки и стока плазмона.

A.V. KHARITONOV<sup>1,2</sup>, S.S. KHARINTSEV<sup>1,2</sup>, A.I. FISHMAN<sup>1</sup>,  
M.Kh. SALAKHOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Kazan Federal University*

<sup>2</sup>*Institute of Perspective Researches of Tatarstan Academy of Sciences, Kazan*

## **RAMAN LASING IN TITANIUM NITRIDE PLASMONIC MICRORESONATOR**

This work focuses on stimulated Raman scattering processes in titanium nitride, which serves both as Raman and plasmonic medium. It is shown, that the underlying mechanism of Raman amplification is the nonlinear interaction of pump and stokes plasmons.

Вынужденное комбинационное рассеяние света (ВКР) – кубически нелинейный эффект, характеризующийся гигантским усилением интенсивности стока излучения. Явление ВКР лежит в основе работы раман-лазеров и раман-усилителей, предназначенных для перестройки частоты лазерных источников [1].

Традиционно, для наблюдения нелинейно-оптических откликов применяются импульсные лазеры с пиковыми мощностями ~1 Вт и макроскопические нелинейные кристаллы. Одной из важных задач фотоники является генерация нелинейных сигналов в пределах локальной области (<1 мкм<sup>3</sup>) при использовании непрерывной накачки малой мощности (~10<sup>-3</sup> Вт). Устройства, основанные на эффекте плазмонного резонанса, обладают потенциалом субдифракционной нанофокусировки и

позволяют увеличить сечение нелинейных процессов на несколько порядков [2]. Однако широкого распространения такие нелинейные устройства не получили. Причиной этому явилось то, что стандартные плазмонные материалы (Au, Ag, Cu, Al, Pt) склонны к деформациям при воздействии высокоинтенсивных полей.

В данной работе исследуются нелинейно-оптические свойства нитрида титана – нового тугоплавкого металла плазмоники [3]. Помимо высокой температуры плавления, нитрид титана является раман-активной средой, что делает его уникальным плазмонным материалом. Благодаря этому, нитрид титана может быть использован для генерации сигнала ВКР в качестве нелинейной и одновременно усиливающей среды. Для этой цели были приготовлены планарные наноструктуры из нитрида титана, представляющие собой плазмонные резонаторы типа Фабри-Перо (рис. 1). Оптимальные геометрические параметры резонатора определялись с помощью компьютерного моделирования методом FDTD с использованием экспериментальных данных о диэлектрической проницаемости синтезированного нитрида титана. Были зарегистрированы спектры комбинационного рассеяния и исследована зависимость интенсивности линии нитрида титана от мощности падающего света (рис. 2).

Таким образом, был получен сигнал ВКР при использовании непрерывной накачки мощностью  $<10$  мВт.

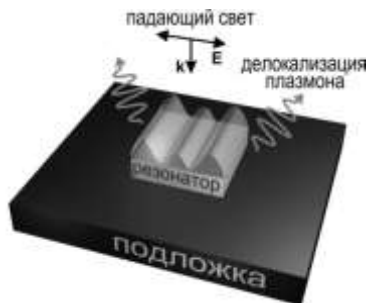


Рис. 1. Возбуждение поверхностных стоячих волн в плазмонном резонаторе

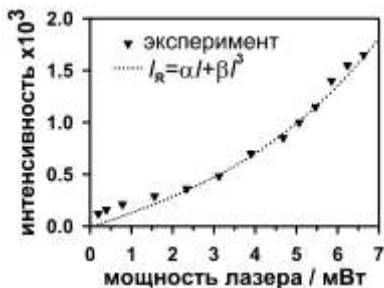


Рис. 2. Зависимость интенсивности линии нитрида титана от мощности накачки

#### Список литературы

1. Pask H.M. // Prog. Quant. Electron. 2003. V.27. P.3-56.
2. Shuller J.A., et al. // Nature mat. 2010. V.9. P.193-204.
3. Guller U., Boltaseva A., Shalaev V. // Science. 2014. V.344. P.263-264.

К.И. ЗЕМСКОВ, О.В. КАРПОВА<sup>1</sup>, А.Д. КУДРЯВЦЕВА,  
Т.В. МИРОНОВА, С.М. ПЕРШИН<sup>2</sup>, Е.К. ПЕТРОВА<sup>1</sup>,  
М.А. СТРОКОВ, Н.В. ЧЕРНЕГА

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

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

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

## **ВЫНУЖДЕННОЕ НИЗКОЧАСТОТНОЕ КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ В СУСПЕНЗИЯХ ВИРУСОВ ТАБАЧНОЙ МОЗАИКИ И ВИРУСОВ КАРТОФЕЛЯ (АВК и ХВК)**

Вынужденное низкочастотное комбинационное рассеяние (ВНКР), являющееся результатом взаимодействия лазерных импульсов с акустическими колебаниями наночастиц, зарегистрировано в суспензиях вируса табачной мозаики и двух типов картофельных вирусов. Измерены частотные сдвиги, коэффициент преобразования (до 10%) и пороги ВНКР.

K.I. ZEMSKOV, O.V. KARPOVA<sup>1</sup>, A.D. KUDRYAVTSEVA,  
T.V. MIRONOVA, S.M. PERSHIN<sup>2</sup>, E.K. PETROVA<sup>1</sup>,  
M.A. STROKOV, N.V. TCHERNIEGA

*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

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

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

## **STIMULATED LOW-FREQUENCY RAMAN SCATTERING IN SUSPENSIONS OF TOBACCO MOSAIC VIRUSES AND POTATO VIRUSES (PVA AND PVX)**

Stimulated low-frequency Raman scattering (SLFRS), caused by laser pulses interaction with nanoparticles acoustic vibrations, was registered in the suspensions of tobacco mosaic viruses and two types of potato viruses. SLFRS frequency shifts, conversion efficiency (up to 10%) and threshold have been measured.

Вирусы представляют собой хороший пример монодисперсной системы нанобъектов. Многие вирусы имеют сферическую или цилиндрическую форму и обладают набором акустических собственных частот в гигагерцовой области. Для исследования вирусов, их идентификации и для воздействия на них может быть использовано низкочастотное комбинационное рассеяние света – неупругое рассеяние



на акустических колебательных модах наночастиц [1,2] или его вынужденный аналог: вынужденное низкочастотное комбинационное рассеяние света (ВНКР) [3,4]. Мы впервые зарегистрировали ВНКР в суспензиях вирусов растений. ВНКР наблюдалось в вирусах табачной мозаики в буфере Tris-HCl pH7.5 [5], в картофельном вирусе АВК в воде и в картофельном вирусе ХВК в буфере Tris-HCl pH7.5.

Внешняя оболочка данных вирусов состоит из белков, расположенных по спирали. Генетическим материалом является рибонуклеиновая кислота, расположенная внутри белковой оболочки также по спирали. Вирус табачной мозаики представляет собой жесткий стержень с узким внутренним каналом. Картофельные вирусы более тонкие и более гибкие.

Рассеяние возбуждалось импульсами рубинового лазера ( $\lambda = 694.3$  нм,  $\tau = 20$  нс,  $E_{\max} = 0.3$  Дж,  $\Delta\nu = 0.015$  см<sup>-1</sup>, расходимость  $3.5 \cdot 10^{-4}$  рад) и регистрировалось с помощью интерферометров Фабри-Перо. На рис. 1 представлен спектр ВНКР в вирусе ВТМ в буфере.

Ширина линии ВНКР и расходимость рассеянного излучения близки к соответствующим величинам возбуждающего излучения. Спектральные сдвиги компонент ВНКР ( $\nu$ ), коэффициенты преобразования ( $\eta$ ), пороги (Р), размеры (D – диаметр, L – длина) приведены в табл. 1.



Рис. 1. Спектр ВНКР в ВТМ в буфере: ниже порога (а), выше порога (б)

Таблица 1. Характеристики ВНКР в вирусах

Вид вируса	$\eta$ %	Р ГВт/см <sup>2</sup>	$\nu$ ГГц	DxL нм
ВТМ	5	0.07	60	18x300
АВК	10	0.03	9, 18	15x730
ХВК	10	0.035	6, 12	13.5x715

Частота собственного колебания для дышащей моды вируса ТМВ, рассчитанная в работе [2] (63 ГГц для вирусов в воде), близка к нашей экспериментальной величине.

#### Список литературы

1. Duval E., Boukenter A., Champagnon B. // Phys. Rev. Lett. 1986. V.56. P.2052-2055.
2. Balandin A., Fonoberov V. // J. of Biomedical Nanotechnology. 2005. V.1. P.90.
3. Tcherniega N.V., et al. // Optics Letters. 2010. V.35. P.300-302.
4. Tcherniega N.V., et al. // Optics Letters. 2013. V.38. P.824-826.
5. Karpova O.V., Kudryavtseva A.D., et. al.// Laser Phys. Lett. 2016. V.13. 085701.

Д.А. КОЛЫМАГИН<sup>1</sup>, Р.Д. ЗВАГЕЛЬСКИЙ<sup>1</sup>, Д.А. ЧУБИЧ<sup>1</sup>,  
А.Г. ВИТУХНОВСКИЙ<sup>1,2</sup>

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

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

## **СОЗДАНИЕ 3D ПЕРИОДИЧЕСКИХ НАНО/МИКРОСТРУКТУР ДЛЯ ФОТОНИКИ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ПИСЬМА**

Методом прямого лазерного письма (DLW, Direct Laser Writing) созданы полимерные 3D периодические фотонные кристаллы. Латеральное и аксиальное разрешение литографической схемы можно повысить, используя улучшенный метод прямого лазерного письма – STED-DLW. Морфологические особенности созданных структур были измерены с помощью SEM, а также исследованы их оптические свойства.

D.A. KOLYMAGIN<sup>1</sup>, R.D. ZVAGELSKY<sup>1</sup>, D.A. CHUBICH<sup>1</sup>,  
A.G. VITUKHNOVSKY<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny*  
<sup>2</sup>*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

## **FABRICATION OF 3D PERIODIC NANO/MICROSTRUCTURES FOR PHOTONICS BY DIRECT LASER WRITING**

Polymer 3D periodic photonic crystals were fabricated with direct laser writing (DLW). Lateral and axial resolution of lithographic scheme can be improved using STED inspired DLW. The morphological features of fabricated structures were measured with SEM, also the optical properties were investigated.

Фотонные кристаллы – структуры с периодически меняющейся диэлектрической проницаемостью, период которой сравним с длиной волны света, – являются крайне востребованными для создания фотонных устройств нового поколения. Фотонные кристаллы применяются для спектральной фильтрации излучения, концентрации электромагнитного поля в микрорезонаторах и волноводах, управления распространением света, создания сред с отрицательным показателем преломления и устройств оптической памяти.

В зависимости от числа трансляционных симметрий принято выделять 1D, 2D и 3D периодические фотонные кристаллы.

Актуальной задачей является разработка аддитивной технологии создания диэлектрических 3D периодических структур – прямого лазерного письма. Данный метод основан на явлении фотополимеризации при освещении резиста сфокусированным лазерным излучением. Последующее растровое сканирование позволяет создавать произвольные трехмерные структуры. При этом разрешение прямого лазерного письма ограничено дифракцией и определяется длиной волны излучения, используемой для записи.

Разрешение прямого лазерного письма при неизменной длине волны возбуждения можно повысить, если использовать идею STED (STimulated Emission Depletion – Гашение вынужденным излучением) для уменьшения аксиального и латерального размеров эффективно возбужденной области [1]. Суть метода заключается в использовании второго лазера – лазера гашения с определенной конфигурацией электромагнитного поля (11 мода Лаггер-Гаусса) – для стимулирования излучательных переходов по краю фокального пятна, то есть для уменьшения размера возбужденной области.

Следует отметить, что использование идеи STED в люминесцентной микроскопии было отмечено в 2014 г. Нобелевской премией по химии (S.Hell). На сегодняшний день в микроскопии продемонстрировано разрешение 2.4 нм при использовании света с длиной волны 775 нм [2].

Создана установка для STED-DLW фотолитографии на основе фемтосекундного Ti:S-лазера с перестраиваемой длиной волны излучения 780 – 860 нм и длительностью импульса 50 фс, а также непрерывного лазера гашения с длиной волны 532 нм. Скорость лазерного письма задается в диапазоне от 1 до 300 мкм/с. Латеральное разрешение – 150 нм.

С помощью улучшенной технологии прямого лазерного письма были созданы фотонные кристаллы типа поленница (woodpile) с контролируемым размером структур (вплоть до 300 нм) и латеральными периодами 0,5 мкм, 0,6 мкм, 1 мкм, 2 мкм, и аксиальным периодом 1 мкм. Морфология полученных структур была исследована с помощью сканирующего электронного микроскопа, а также были исследованы их оптические свойства.

#### *Список литературы*

1. Eliseev S.P., et al. // Nanotechnologies in Russia. 2016. V.11. Is.3. P.200-207.
2. Hell S.W. //Angew. Chem. Int. Ed. 2015. V.54. P.8054-8066.

Н.В. МИНАЕВ<sup>1</sup>, М.А. ТАРХОВ<sup>3</sup>, Д.С. ДУДОВА<sup>1,2</sup>,  
В.Н. БАГРАТАШВИЛИ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,  
Троицк*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

<sup>3</sup>*ЗАО «Сверхпроводниковые нанотехнологии», Москва*

## **НЕЛИНЕЙНАЯ ФЕМТОСЕКУНДНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ ЛИТОГРАФИЯ**

Приведены результаты по разработке нового подхода к оптической лазерной фотолитографии, основанной на двухфотонном поглощении фемтосекундного лазерного излучения в тонких пленках стандартных литографических фоторезистов, а также органических и гибридных (органонеорганических) оптических материалов. Разработанный подход применяется для создания практически важных микро- и нано-структур, таких как одноквантовые сверхпроводниковые детекторы и планарные волноводные структуры.

N.V. MINAEV<sup>1</sup>, M.A. TARKHOV<sup>3</sup>, D.S. DUDOVA<sup>1,2</sup>,  
V.N. BAGRATASHVILI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Photonic Technologies, – branch of FSRC “Crystallography and  
Photonics” of the RAS, Troitsk*

<sup>2</sup>*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)*

<sup>3</sup>*CJSC “Superconducting Nanotechnology”, Moscow*

## **NONLINEAR FEMTOSECOND OPTICAL LITHOGRAPHY**

Presents the results of develop a new approach to optical laser lithography based on two-photon absorption of femtosecond laser radiation in thin films of standard lithographic photoresists and organic and hybrid (organic-inorganic) optical materials. The developed approach is used to create practical importance of micro- and nanostructures, such as single-photon detectors and planar waveguide structures.

В настоящее время изготовление наноструктур различного типа основывается на методах электронной, рентгеновской и оптической литографии с последующим процессом травления. Эти методы позволяют получить высокое пространственное разрешение в фоторезисте, однако они не лишены ряда недостатков. В случае электронной литографии присутствует паразитный эффект влияния вторичных электронов, формирующихся под действием электронного пучка (эффект близости) в полимерном фоторезисте. В случае оптической литографии оказывает

влияние дифракционный предел, либо необходимость использования большого количества дорогих фотошаблонов. Актуальные научные исследования в области литографии направлены на минимизацию или учета влияния эффекта близости в случае электронной литографии и уменьшение длины волны используемого света при оптической литографии с целью улучшения пространственного разрешения. При этом всем в случае электронной и фотолитографии имеются ограничения на выбор резистов. Нами предлагается альтернативный подход, основанный на особенностях процесса взаимодействия фемтосекундного импульсного излучения с тонкопленочными фоторезистами. Благодаря возможности использования эффекта двухфотонного поглощения появляется возможность формировать окна в фоторезистах с размерами существенно меньше длины волны воздействующего излучения. Данный подход практически не ограничен в размере рабочей области и имеет принципиально большие скорости формирования структур любой сложности. Предварительные эксперименты по нелинейной фемтосекундной лазерной фотолитографии тестовых образцов с нанесенным фоторезистом ПММА толщиной 100-200 нм продемонстрировали возможность получения структур с пространственным разрешением порядка 100 нм. Был изготовлен рисунок тестового фоточувствительного элемента - меандра сверхпроводникового однофотонного детектора, и проведено последующее плазмохимическое травление. Были получены следующие параметры – ширина сверхпроводящей полоски 140 нм и зазор между ними – 180нм. Экспериментально было показано, что в области токов смещения 0.85-0.98 от критического, детектор работает в однофотонном режиме, при этом квантовая эффективность составляет 8% на длине волны 1,3 мкм скорости темнового счета равного  $10 \text{ с}^{-1}$ .

В работе используется уникальный фемтосекундный лазерный комплекс Института Фотонных Технологий ФНИЦ "Кристаллография и Фотоника" РАН. В нем применяется излучение второй гармоники твердотельного иттербиевого фемтосекундного лазера с длиной волны 525нм, прецизионная доставка по заданной программе осуществляется с помощью системы микро-структурирования M3DS. Система позиционирования построена на прецизионных трансляторах на воздушной подушке ABL1000, производства компании Aerotech, и высокоскоростном гальвосканере производства компании ScanLab. Относительная точность позиционирования с помощью трех координатного транслятора не хуже 50 нм на длинах до 100 мм.

С.Н. МЕНСОВ<sup>1,2</sup>, Ю.В. ПОЛУШТАЙЦЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского*

<sup>2</sup>*Институт металлоорганической химии им. Г.А. Разуваева РАН,  
Нижний Новгород*

## **ОПТИЧЕСКОЕ СОГЛАСОВАНИЕ СВЕТОВОДОВ В ФОТОПОЛИМЕРИЗУЮЩИХСЯ СРЕДАХ**

Показано, что в результате фотополимеризации под воздействием светового излучения (с длиной волны 0.63 мкм), выходящего из торцов соединяемых волокон, образуется волноведущая структура с градиентным профилем показателя преломления, согласованным с оптическим волокном, которая обеспечивает эффективное соединение разнотипных световодов на длине волны телекоммуникационного излучения 1.55 мкм.

S.N. MENSOV<sup>1,2</sup>, Yu.V. POLUSHTAYTSEV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod*

<sup>2</sup>*Razuvaev Institute of Organometallic Chemistry of RAS, Nizhny Novgorod*

## **OPTICAL MATCHING OF FIBERS IN PHOTOPOLYMERISABLE MEDIA**

It is shown that photopolymerization under the influence of light (the wavelength 0.63 microns), leaving the ends of the joined fibers, results in the formation of the waveguiding structure with the gradient profile of refractive index matched with the optical fiber providing efficient coupling of different optical fibers at the telecommunication radiation with the wavelength 1.55 microns.

Перспективность применения фотополимеризующихся сред для соединения оптических волокон обусловлена высокой эффективностью полимерных коннекторов при относительно низких требованиях к подготовке торцов соединяемых световодов и незначительных затратах времени на формирование согласующей структуры. При этом на этапе формирования допускается существенное осевое смещение стыкуемых волокон (до нескольких диаметров ядра световода) при значительных зазорах между торцами (до нескольких миллиметров). «Самосогласование» волноведущих структур на стадии формирования коннектора за счёт установления собственных модовых режимов распространения воздействующего излучения в прозрачной полимеризующейся среде позволяет соединять волокна разных

стандартов. Решение задачи согласования разнотипных световодов может найти применение не только в системах передачи данных, но и в современной измерительной технике, в которой наряду со стандартными световодами используются специальные оптические волокна в качестве основы волоконных сенсорных систем. Оптические преобразователи востребованы и в топологии высокопроизводительных вычислительных комплексов, разработка которых в настоящее время направлена на создание распределённых многопроцессорных систем, использующих оптическое соединение узлов. Согласование планарных световодов оптических печатных плат напрямую с оптоволоконными линиями связи позволит более эффективно организовывать и использовать информационные сети.

В работе была исследована возможность оптического соединения в фотополимеризующей композиции типовых многомодовых (MMF) и одномодовых световодов различных марок (SMF-28, CS-980, Ge-507sm) с величиной потерь не хуже 3 дБ. Осуществлено согласование пары волокон разных стандартов с существенным отличием диаметров распределения поля основной моды (MMF и SMF-28, SMF-28 и CS-980, SMF-28 и Ge-507sm). На примере согласования стандартного одномодового волокна (диаметр ядра 8.2 мкм,  $\Delta n = 0.37\%$ ) с планарным световодом оптической печатной платы (сторона 2.5 мкм,  $\Delta n = 0.96\%$ ) показано, что эффективность прохождения излучения через синтезированный светом стыковочный модуль может достигать 70% даже в направлении из волоконного (более широкого) световода в планарный (более узкий) световод.

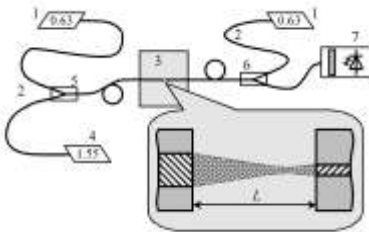


Рис. 1. Схема экспериментальной установки



Рис. 2. Фотография согласующей структуры для многомодового (слева) и одномодового (справа) волокон

И.В. БОГАЧКОВ, А.И. ТРУХИНА  
*Омский государственный технический университет*

## **ПРОБЛЕМЫ МОНИТОРИНГА СОВРЕМЕННЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ**

В исследовании рассмотрены проблемы современных систем удаленного контроля оптических волокон, работающих на основе рефлектометрических методов. Рассмотрены возможности применения бриллюэновских рефлектометров в составе современных систем мониторинга.

I.V. BOGACHKOV, A.I. TRUKHINA  
*Omsk State Technical University*

## **PROBLEMS OF MONITORING OF MODERN FIBER-OPTIC COMMUNICATION LINES**

Problems of modern remote optical fiber test systems (RFTS) working on the basis of the time-domain reflectometry methods are presented in this research. Possibilities of use of Brillouin optical time-domain reflectometers in modern monitoring systems are considered.

Важной задачей мониторинга современных волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), кроме выявления дефектов в оптических волокнах (ОВ), является своевременное обнаружение несанкционированного доступа в ВОЛС, определение участков ОВ с повышенными механическими натяжениями или с изменённой температурой [1].

Данная задача может быть решена системой удаленного контроля оптических кабелей (RFTS), основанной на методе обратного рассеяния. Этот метод реализуется обычно оптическими импульсными рефлектометрами (OTDR), которые диагностируют состояние ОВ по обратному рассеянию световой волны зондирующих импульсов.

Система состоит из удаленного модуля тестирования ОВ, программы привязки топологии сети к электронной географической карте местности, а так же базы данных оптических компонентов, критериев и результатов контроля [1, 2]. Возможен мониторинг как пассивных, так и активных ОВ.

При работе RFTS сравнивает текущую и эталонную рефлектограммы с последующим сопоставлением их параметров. В результате система определяет место повреждения ОВ ВОЛС (разрыв ОВ, обнаружение несанкционированного доступа и т. п.) [1, 3].



Повышенное натяжение ОВ ВОЛС вызывает его деградацию. Для обеспечения долговечной работы необходимы соответствующие условия, одно из которых – отсутствие механических напряжений в ОВ.

Обычные OTDR не в состоянии определить натяжение ОВ, поэтому в последнее время стали использоваться бриллюэновские рефлектометры (BOTDR), принцип работы которых основан на анализе спектра бриллюэновского рассеяния.

Важным достоинством BOTDR является их способность обнаруживать опасные механические натяжения в ОВ и участки ОВ, имеющие изменённую температуру, что принципиально недоступно OTDR [2].

Существенное изменение температуры или натяжения некоторого участка ОВ может сигнализировать о появлении «проблемного» участка на трассе прокладки ВОЛС.

Например, существенное повышение температуры участка ВОЛС может наблюдаться при прорыве теплотрассы в месте прокладки ОК.

Наоборот, в зимнее время при «оголении» ОК из-за появления трещин в почве или иных разрушений защитных элементов на трассе прокладки ОК будет наблюдаться понижение температуры «проблемного» участка ВОЛС.

Своевременное обнаружение такого участка позволяет принять необходимые меры по устранению аварии до разрушения ВОЛС.

Использование BOTDR в системе мониторинга пассивных ОВ позволяет обнаружить не только абсолютное натяжение ОВ, но и определить распределение этого натяжения вдоль волокна [3].

Несмотря на преимущества BOTDR, в настоящее время их применение в системах мониторинга ограничено из-за их высокой стоимости. Поэтому целью дальнейших исследований является нахождение способов удешевления BOTDR для интеграции их в системы мониторинга ВОЛС, что позволило бы более качественно производить контроль ОВ и увеличить срок службы ВОЛС.

#### *Список литературы*

1. Богачков И.В., Горлов Н.И. Новые задачи технической эксплуатации разветвленных волоконно-оптических сетей // Омский научный вестник. 2009. Вып.1 (77). С.195-198.
2. Богачков И.В., Трухина А.И. Моделирование бриллюэновских рефлектограмм оптических волокон на основе экспериментальных данных для использования в виртуальных лабораторных работах. // Методические вопросы преподавания инфокоммуникаций в высшей школе. 2016. Т.5. №3. С.11-15.
3. Богачков И.В., Трухина А.И. Обзор способов формирования каналов утечки информации в оптических волокнах // Современные проблемы телекоммуникаций: Мат. Рос. науч.-техн. конф. Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2016. С.291-295.

К.А. ДМИТРИЕВА, К.А. БОРОДАКО, А.В. ШЕЛЯКОВ,  
А.А. ИВАНОВ, А.А. ТИМОФЕЕВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ С ОБРАТИМОЙ ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ**

Работа посвящена изготовлению и исследованию экспериментальных образцов микромеханических элементов из быстрозакаленного сплава TiNiCu, в котором обратимый эффект памяти формы формируется в результате воздействия лазерного излучения. С помощью метода фокусированных ионных пучков получена ламель толщиной 5 мкм, шириной 7 мкм и длиной 100 мкм, изгибающаяся обратимо на 2,5 мкм в цикле нагрев – охлаждение.

K.A. DMITRIEVA, K.A. BORODAKO, A.V. SHELYAKOV,  
A.A. IVANOV, A.A. TIMOFEEV

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

## **APPLICATION OF LASER RADIATION FOR CREATING MICROMECHANICAL ELEMENTS WITH TWO-WAY SHAPE MEMORY**

The work deals with production and research of experimental samples of micromechanical elements based on the rapidly quenched TiNiCu alloy, in which a two-way shape memory effect is formed as a result of impact of the laser radiation. By the technique of focused ion beams a lamella with thickness of 5 microns, a width of 7 microns and 100 microns in length was obtained, bending reversibly to 2.5 microns in the heating-cooling cycle.

Сегодня научно-технический прогресс задает тенденцию в миниатюризации, экономичности и быстродайствии исполнительных элементов во многих областях инженерии, в связи с чем ведется поиск и разработка новых материалов для их изготовления. Одними из наиболее перспективных являются сплавы с эффектом памяти формы (ЭПФ), в частности, тонкие ленты из быстрозакаленного сплава TiNiCu [1]. Применение сплавов с ЭПФ в подобных устройствах предполагает обратимое изменение формы в цикле нагрев-охлаждение, т.е. проявление свойства обратимого ЭПФ (ОЭПФ). В работах [2, 3] показано, что одним из способов задания ОЭПФ для тонких лент сплава является обработка

поверхности излучением лазера, в результате чего образовывался аморфно-кристаллический композит, обратимо изменяющий форму в цикле нагрев-охлаждение. Изготовление миниатюрных элементов предполагает также использование новейших методов, в частности метода фокусированных ионных пучков (ФИП) [4].

Целью данной работы являлось изготовление экспериментальных образцов микромеханического элемента с помощью метода ФИП из быстрозакаленных лент сплава TiNiCu с ОЭПФ, полученным в результате локальной модификации поверхностного слоя ультракоротким импульсом лазерного излучения.

В работе в качестве исходного материала использовался сплав  $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ , полученный методом быстрой закалки из расплава в виде аморфной ленты толщиной 35 мкм и шириной 2 мм. Исходная лента была прокатана на 24-валковом стане до толщины 19-20 мкм, а затем утонялась до толщины 5 мкм методом электрохимического полирования в растворе PLS-3. После этого лента изотермически отжигалась для придания памяти формы в изогнутом состоянии в муфельной печи при температуре 500°С в течение 6 минут. Полученные образцы подвергались воздействию одиночного импульса лазерного излучения для формирования ОЭПФ.

В качестве источника лазерного излучения использовался эксимерный лазер KrF с длиной волны 248 нм и длительностью импульса 20 нс. При плотности энергии 6 мДж/мм<sup>2</sup> на поверхности ленты был получен аморфный слой толщиной в среднем 0,4 мкм. После проведенной обработки образец приобрел ярко выраженный ОЭПФ. В дальнейшем в месте воздействия лазером с помощью модуля ФИП была вырезана ламель шириной 7 мкм и длиной 100 мкм, которая методом CVD была закреплена на игле наноманипулятора SmarAct. Эксперимент показал, что полученная ламель обратимо отклоняется на величину 2,5 мкм в цикле нагрев-охлаждение, демонстрируя ОЭПФ. В дальнейшем полученный элемент может быть использован для создания микромеханических устройств, в частности, микропинцета для захвата и манипулирования микро- и нанообъектами.

#### *Список литературы*

1. Jani J.M., Leary M., Subic A., Gibson M.A. // *Materials and Design*. 2014. V.56. P.1078.
2. Shelyakov A.V., Sitnikov N.N., et al. // *Int. J. of Smart and Nano Materials*. 2011. V.2. No 2. P.68-77.
3. Borodako K.A., Grigoriev A.A., Shelyakov A.V., Sitnikov N.N., Ivanov A.A., Fominski V.Yu., Shayfer D.V. // *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. V.737. P.012027.
4. Кузнецова М.А., Лучинин В.В., Савенко А.Ю. // *Нано- и микросистемная техника*. 2009. №8. С.24-31.

А.И. ВАНИН, В.Г. СОЛОВЬЕВ  
 Псковский государственный университет

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗОНАНСА ФАНО В НАНОСТРУКТУРИРОВАННОМ МАТЕРИАЛЕ

Оптические свойства наноструктурированных материалов опал-Ag смоделированы на основе брэгговской дифракции и резонанса Фано.

A.I. VANIN, V.G. SOLOVYEV  
 Pskov State University

## MODELING OF FANO RESONANCE IN NANOSTRUCTURED MATERIAL

Optical properties of nanostructured material Ag / opal have been modeled on the basis of the Bragg diffraction and the Fano resonance.

Спектры брэгговского отражения от матрицы опала и композита опал-Ag [1] для двух углов падения приведены на рис. 1а. В спектре отражения композита опал-Ag проявляется резонанс Фано (асимметрия пика отражения и характерный переход от максимума отражения к минимуму).

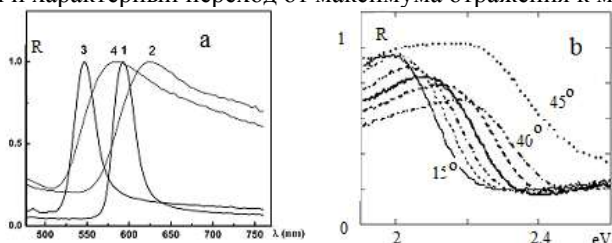


Рис. 1. Нормированные спектры отражения исходной матрицы опала (1, 3) и композита опал-Ag (2, 4) при углах падения 15° (1, 2) и 35° (3, 4) [1] (а); спектры отражения композита (б)

Спектр отражения при резонансе Фано описывается соотношением [2]

$$R(\varepsilon) = 1 - \frac{(\varepsilon - q)^2}{\varepsilon^2 + 1} \cdot \frac{1}{1 + q^2}, \quad (1)$$

где  $q$  – параметр Фано, а  $\varepsilon = \frac{E - E_R}{\Gamma}$ , где  $E$  – энергия,  $E_R$  и  $\Gamma$  – положение и ширина резонанса Фано [2]. На рис. 1б приведены спектры отражения

композита при различных углах падения. Сравнение спектров отражения (рис. 1b) с формулой (1) выявляет слабую зависимость спектра от параметра  $q$ , а положение резонанса Фано ( $E_R$ ) существенно меняется. Приближение спектра Фано (1) по положению резонанса (параметр  $E_R$ ) и наклону кривой (параметр  $\Gamma$ ) при переходе от максимума к минимуму позволяет оценить параметры резонанса Фано (рис. 2b). На собственно резонанс Фано накладывається и структура спектра отражения матрицы опала, разделить их на данном этапе исследований не удалось.

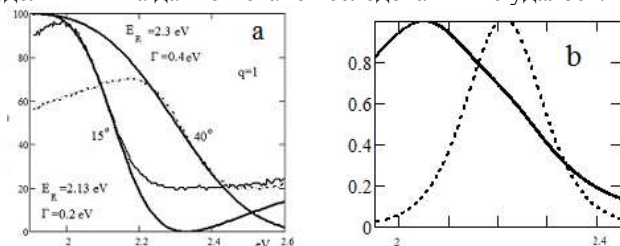


Рис. 2. Сравнение резонанса Фано (1) со спектром отражения композита при 15 и 40 градусах (а); моделирование по (2) (b)

Анализ процесса изготовления композита (при насыщении тока электролиза) и спектров отражения от композита (резонанс Фано) говорит о вероятном образовании дендритов серебра в структуре опала или неупорядоченных частиц серебра, заметно меньших длины волны, в порах матрицы опала. Рассеяние света на дендритах или неупорядоченных малых частицах серебра можно описать амплитудой прохождения (аналог прохождения и отражения от барьера в квантовой теории), например [3]:

$$t \propto \frac{E - E_{zero}}{E - E_R + i\Gamma}, \quad (2)$$

где  $E_{zero}$  – энергия обращения в нуль амплитуды прохождения через барьер (дендрит, малую частицу). Оценка коэффициента брэгговского отражения с рассеянием на малых частицах в приближении (2) для рассеяния на неоднородностях, качественно согласуется с экспериментальными данными (рис. 2b). Ответ на вопрос – дендриты или неупорядоченные частицы Ag – требует дополнительного исследования.

#### Список литературы

1. Veisman V.L., Romanov S.G., Solovyev V.G., Yanikov M.V. // Environment. Technology. Resources: Proc. of X Int. Scientific and Pract. Conf. Rezekne, Latvia, 2015. V.1. P.230-231.
2. Fano U. // Physical Review. 1961. V.124. P.1866-1878.
3. Joe Y.S., Satanin A.M., Kim C.S. // Physica Scripta. 2006. V.74. P.259-266.

**В.В. ГАВРУШКО, А.С. ИОНОВ, О.Р. КАДРИЕВ, В.А. ЛАСТКИН**  
*Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого*

**ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ  
НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ**

Приведены спектральные характеристики дифференциальных фотоприемников на основе кремния для коротковолновой области. Установлена зависимость длинноволновой границы чувствительности от технологических режимов.

**V.V. GAVRUSHKO, A.S. IONOV, O.R. KADRIEV, V.A. LASTKIN**  
*Yaroslav-the-Wise Novgorod State University*

**OPTICAL CHARACTERISTICS OF DIFFERENTIAL  
PHOTODETECTORS BASED ON SILICON**

Shows the spectral characteristics of differential photodetectors based on silicon for short-wave region. The dependence of long-wave sensitivity boundaries of technological regimes.

Одной из важнейших характеристик фотоприемника является спектральная. Интересным способом формирования спектральной чувствительности фотоприемника является метод вычитания сигналов рядом расположенных чувствительных площадок с различной спектральной характеристикой (дифференциальные фотоприемники) [1]. Достоинством таких фотоприёмников является возможность получения селективной спектральной чувствительности с использованием технологических операций только полупроводникового производства, без применения внешних фильтров.

Исследованные фотоприемники представляли собой два одинаковых по площади фотодиода, выполненные на единой подложке. Технология одного из каналов обеспечивала получение высокой чувствительности в УФ области [2]. Второй канал формировался одновременно с первым, с использованием общих технологических операций, но с добавлением на заключительной стадии процесса имплантации высокой дозы мышьяка. Дифференциальный сигнал, имел ярко выраженную селективную спектральную характеристику, сдвинутую в УФ область. На рис. 1 приведены относительные спектральные характеристики фотоприемников

для нескольких доз легирования мышьяком. Коротковолновая граница у всех фотоприемников имела близкое значение, а длинноволновая возрастала с увеличением дозы имплантации. На рис. 2 приведена дозовая зависимость длинноволновой границы по 50% уровню ( $\lambda_{0,5}$ ). В диапазоне доз от 200 до 2000 мкКл/см<sup>2</sup> смещение длинноволновой границы, выраженное в мкм, подчинялось зависимости:

$$\lambda_{0,5} = 0,35 * \exp(Q/Q_0),$$

где  $Q_0=6750$  мкКл/см<sup>2</sup>.

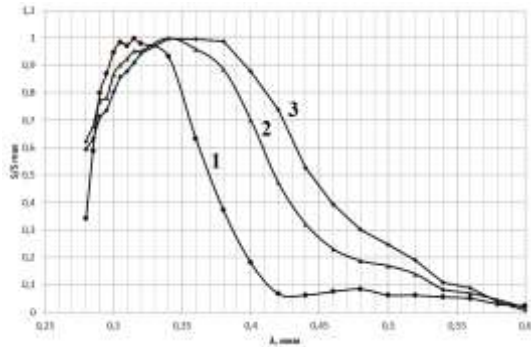


Рис. 1. Спектральные характеристики фотоприемников, дозы легирования 1-200, 2-700, 3-2000 мкКл/см<sup>2</sup>

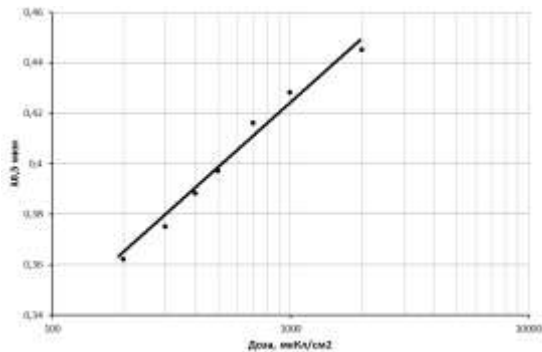


Рис. 2. Зависимость длинноволнового края спектральной характеристики по уровню  $\lambda_{0,5}$  от дозы легирования второго канала

*Список литературы*

1. Патент RU №156627. Н01L 31/068 от 05.05.2015.
2. Гаврушко В.В., Ласткин В.А. // Вестник НовГУ. 2014. №81. С.53-55.

П.А. ЛОГАЧЕВ, Д.Д. РУЖИЦКАЯ,  
С.Б. РЫЖИКОВ, Ю.В. РЫЖИКОВА

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

## **САМООРГАНИЗАЦИЯ ФРАКТАЛЬНЫХ КЛАСТЕРОВ ДЕНДРИТНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ**

Рассмотрена физическая проблема, связанная с установлением взаимно однозначного соответствия между фрактальными параметрами оптических характеристик кластеров нанодендритов и их особенностями структурного характера. Выявлена высокая степень устойчивости формы 2D кластеров к отклонению частиц в процессах их самоорганизации. Сопоставлены кластерные фрактальные размерности дендритных структур с их дифракционными картинками.

P.A. LOGACHEV, D.D. RUZHITSKAYA,  
S.B. RYZHIKOV, Yu.V. RYZHIKOVA

*Lomonosov Moscow State University*

## **SELF-ORGANIZING OF FRACTAL CLUSTERS OF DENDRITIC SYSTEMS**

Physical problem focused on setting correspondence between the fractal parameters of the optical characteristics of nano dendrite clusters and their structural features is considered. The stability of form of two-dimensional clusters of particles to their deviations in the self-organization processes is established. The cluster fractal dimensions of dendritic structures and their diffraction patterns presented.

В настоящее время дендритные агрегаты и их модели широко используются в различных областях науки и техники [1, 2]. В частности, их исследование представляет практический интерес при разработке методов оптической диагностики, в устройствах оптической записи информации, а также при создании самоорганизующихся сверхрешеток с заданной размерностью.

Формирование дендритных решетчатых структур осуществлялось с учетом свойств ассоциации наночастиц в двумерном пространстве на основе использования агрегационных стохастических моделей частица-кластер [3]. В данной работе рассмотрена физическая проблема, относящаяся к установлению связи между фрактальными характеристиками структуры анализируемых решетчатых систем и их оптическими характеристиками. Представлено обобщение анализа



структурных свойств фрактальных объектов разных групп [4, 5] на образования дендритной формы. Выявлена высокая степень устойчивости формы двумерных кластеров к отклонению частиц от движения к его центру в процессах самоорганизации.

Полученные распределения амплитуды поля и интенсивности дифрагированных волн на дендритных решетчатых структурах анализировались в приближении Релея-Зоммерфельда. Количественная оценка самоподобных свойств, проявляющихся как в самих анализируемых объектах, так и в их дифракционных картинах проводилась на основе определения кластерной фрактальной размерности [6].

Проведенное исследование показало, что картинам дифракции излучения на рассматриваемых структурах свойственно проявление самоподобных свойств, характерных для формируемых структур дендритов. При этом значения кластерных фрактальных размерностей полученных картин дифракции оказались близкими к их значениям для формируемых структур в широкой области изменения числа частиц. Полученные фрактальные закономерности могут использоваться при постановке и решении обратной задачи о соответствии регистрируемых световых полей определенным формам кластерных структур дендритных образований, а также для описания электрофизического механизма взаимодействия наночастиц [7].

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ в рамках научного проекта №16-32-00386 мол\_а.

#### *Список литературы*

1. Карпов С. Оптическая память агрегатов металлических наночастиц. // Фотоника. 2012. №3. С.52-60.
2. Mohanty S., Biswal S.K. Dendritic Polymer for Drug Delivery Applications. // IJPAS. 2015. V.4 (4). P.18-27.
3. Samsonov V.M., Kuznetsova Yu.V., D'yakova E.V. Fractal properties of aggregates of metal nanoparticles on solid surface. // Technical Physics. 2016. V.61(2). P. 227-232.
4. Gridchina V.V., Korolenko P.V., Ryzhikova Yu.V. Scaling in the optical characteristics of nanocluster structures. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2015. V.79. No. 12. P.1480-1483.
5. Ковальчук М.В., Короленко П.В., Рыжикова Ю.В. Конструктивные фракталы в моделях пространственного распределения наночастиц. // Ученые записки физического факультета МГУ. 2015. №1. 151401-1-151401-5.
6. Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991.
7. Chiganova G.A. Preparation of dispersions with fractal aggregates of silver nanoparticles. // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2008. 1(2). P.155.

П.О. ЯКУШЕНКОВ<sup>1,2</sup>, Н.С. БАЛАКЛЕЙСКИЙ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет "МИЭТ", Зеленоград

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет),  
Долгопрудный

## ФОТОННЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ

Вычислительная техника началась с машины Тьюринга. С тех пор она развивалась: большие ламповые ЭВМ, полупроводниковая транзисторная электроника, интегральные схемы. В настоящее время интегральная кремниевая электроника достигла своего предела (10 ГГц) и наступило время переходить на фотонную электронику. Доклад посвящен фотонным интегральным схемам, компонентам фотонной элементной базы, уже существующим и перспективным разрабатываемым приборам.

P.O. YAKUSHENKOV<sup>1,2</sup>, N.S. BALAKLEYSKIY<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research University of Electronic Technology "MIET", Zelenograd

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

## PHOTONIC INTEGRATED CIRCUITS

Computers start from Turing machines. Since then, they have evolved: from large vacuum tube computers and semiconductor transistor's electronics to integrated circuits. Currently, integrated silicon electronics has reached its limit (10 GHz), and now it is time to move on photonics. This report focuses on photonic integrated circuits, components of the photonics element base, already existing and future developing devices.

Согласно Международному плану по развитию полупроводниковой технологии к 2030 году масштабирование размера транзистора станет либо невозможным, либо неоправданно дорогим.

Использование high-k диэлектриков, напряженного кремния, многослойной архитектуры и других технологических приемов позволило масштабировать кремниевую технологию долгие годы.

Переход на перспективные технологии Ge, A<sup>3</sup>B<sup>5</sup> соединений (GaAs, InGaAs, InAs) и 2-D кристаллов (графен, нитрид бора, дихалькогениды MoS<sup>2</sup>, WS<sup>2</sup>, NbSe<sup>2</sup>) связан с финансовыми и технологическими трудностями. Одновременно наноразмерные эффекты и материалы интегральной электроники накладывают фундаментальные ограничения на скорость вычислений, потери, задержки и шумы.

В настоящее время большая часть информации передается по волоконным линиям связи и логично обеспечить ее обработку, минуя этап перевода в электрический сигнал. Фотонные схемы могут быть реализованы в одном технологическом базисе с классическими и, ограниченно, с квантовыми элементами вычислений.

Использование в качестве логического элемента оптического транзистора, способного работать на терагерцовых частотах, позволит достичь:

- Минимум на 3 порядка большую скорость обработки и передачи данных
- Помехоустойчивость и радиационную стойкость
- Энергоэффективность по критерию количества операций на джоуль
- Криптографическую защищенность

В настоящее время существует несколько вариантов реализации оптического транзистора [1-6]:

- на одном атоме
- на квантовых точках (InP)
- на интерференции в микрооптических элементах
- на эффектах нелинейной оптики
- на магнитооптических эффектах
- на фотонных кристаллах с нанодобавками Ag и Au

Для выбора оптимальной реализации, необходимо рассмотреть возможности интеграции в существующие технологические циклы, произвести функционально-стоимостной анализ, разработать технологию производства и моделирования соответствующих элементов фотонной схемы.

*Список литературы*

1. Волноводная оптоэлектроника /под ред. Т. Тамира. 1991.
2. Хансперджер Р. Интегральная оптика. 1985.
3. Kirilyuk A., Kimel A.V., Rasing T. Laser-induced magnetization dynamics and reversal in ferrimagnetic alloys. // Rep. Prog. Phys. 2013. 76(2). 026501.
4. Biberman A., Bergman K. Silicon Photonics for Exascale Computing. 2011.
5. Goldren L.A. InP-Based Photonic Integrated Circuits. 2008.
6. Reports of International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS). 2015.

**Н.В. МАСАЛЬСКИЙ**

*Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, Москва*

## **КВАЗИОДНОМОДОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛНОВОДЫ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРЫ “КРЕМНИЙ НА ИЗОЛЯТОРЕ”**

Обсуждается конструкция квазиодномодовых широкоапертурных оптических волноводов на основе структуры “кремний на изоляторе”, в которых одномодовое поведение обеспечивается благодаря низким оптическим потерям фундаментальной моды и увеличенным потерям высших мод из-за наличия дополнительных высоколегированных областей.

**N.V. MASALSKY**

*Scientific research institute of system researches of the PAS, Moscow*

## **THE QUASI SINGLE MODE OPTICAL WAVEGUIDES ON THE BASIS OF STRUCTURE SILICON ON INSULATOR**

Construction of the quasi single-mode wide aperture optical waveguides on the basis of structure silicon on the insulator in which the single mode behavior is provided thanks to low optical losses of a fundamental mode and the increased losses of the higher modes because of existence of additional high doping areas is discussed.

Целью данной работы является поиск новых подходов к построению гетерогенных полосковых оптических волноводов на основе наноразмерных КНИ (кремний на изоляторе) структур, в которых дополнительно сформированы области с высокой концентрацией двух типов - электронов и дырок - свободных носителей заряда (рис. 1а). Эти дополнительные области обеспечивают малые оптические потери и нехарактерное одномодовое поведение широкоапертурных (свыше 10 мкм) высококонтрастных волноводов КНИ с кремниевой сердцевиной толщиной ~ 220 нм. Высоколегированные n+ и p+ области призваны подавить моды высших порядков, неизбежно возникающие в широкоапертурных волноводах, что влечет резкий рост паразитных потерь. Апертура высоколегированной n+ области  $W_{n+}$  примерно равна половине апертуры нелегированной области  $W_0$ . Апертура  $W_{p+}$  p+ области примерно равна  $W_0/4$ , так что  $W_{n+}=2W_{p+}$ . Такая чередующаяся конструкция обеспечивает высокий уровень модовой селекции, подавление переизлучения через боковую грань волновода, общую электронейтральности волноводной структуры.

Свойства фундаментальной моды  $m_0$  (рис. 1б), за исключением меньших оптических потерь, в целом аналогичны свойствам нулевой моды стандартного полупроводникового волновода, сформированного за счет градиента свободных носителей заряда. Принципиальные отличия возникают для всех других мод ( $m_1, m_2, \dots$ ) гетерогенного волновода, эффективные показатели преломления которых близки или меньше показателя преломления области 2 на рис. 1а. Их оптические поля занимают всю область волновода. Следовательно, доля энергии, которая приходится на диссипативную область, во много раз больше, чем у моды  $m_0$  (рис. 1а). Поэтому, у этих мод неизбежно возникает значительное дополнительное затухание на свободных носителях, которое растет с номером моды. Эти выводы подтверждаются результатами моделирования. Расчеты проводились методом распространяющихся пучков и методом конечных разностей во временной области. В качестве иллюстрации, например, показано, что высокая селекция фундаментальной моды достигается для широкоапертурного оптического волновода с общей апертурой 35 мкм и  $W_0=11$  мкм. При этом ее оптические потери очень низкие и составляют -1.5 дБ при уровне легирования составляющем  $9.0 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Для рассматриваемого оптического волновода с характеристической длиной, при которой оптические потери фундаментальной моды составляют -3 дБ, дополнительное затухание для мод высших порядков на свободных носителях относительно уровня затухания фундаментальной моды составляет -23.6 дБ для моды  $m_1$  и -31.4 дБ для моды  $m_2$ .

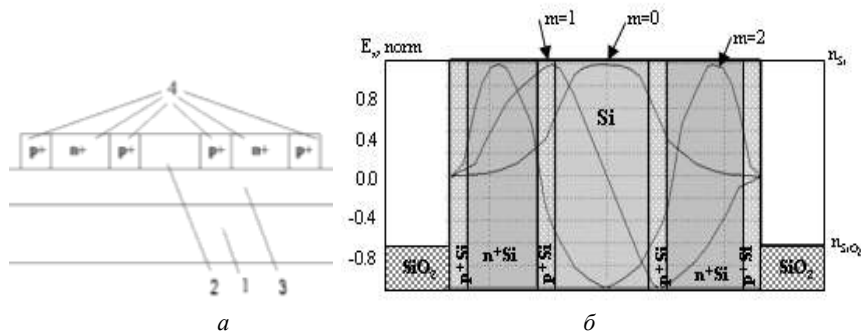


Рис. 1. Схема КНИ гетерогенной волноводной структуры: 1 – кремниевая подложка, 2 – кремниевая сердцевина, 3 – толстый слой SiO<sub>2</sub>, 4 – высоколегированные области (а), нормированное распределение оптических полей первых трех мод при  $W_0=11$  мкм (б)

Д.С. УКОЛОВ, А.Н. ЕГОРОВ, О.Б. МАВРИЦКИЙ,  
А.А. ПЕЧЕНКИН, А.И. ЧУМАКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **ПОВЫШЕНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЛАЗЕРНЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ СУБМИКРОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР С ПОМОЩЬЮ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ИММЕРСИОННЫХ ЛИНЗ**

Обсуждается применение твердотельных иммерсионных линз для расширения возможностей методов лазерной дефектоскопии для диагностики КМОП микроэлектронных структур с субмикро- и наноразмерными элементами. Уменьшение диаметра пучка позволило получить однократные сбои в 65-нм статическом ОЗУ и повысить точность определения параметров чувствительности таких интегральных схем к воздействию лазерного излучения.

D.S. UKOLOV, A.N. EGOROV, O.B. MAVRITSKII,  
A.A. PECHENKIN, A.I. CHUMAKOV

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

## **SOLID IMMERSION LENS APPLICATION FOR RESOLUTION ENHANCEMENT OF LASER DIAGNOSTICS OF SUBMICRON SEMICONDUCTOR STRUCTURES**

The application of solid immersion lens to facilitate laser failure analysis methods for diagnostics of nanoscale elements in CMOS structures is discussed. The resulting reduction of the focused laser beam diameter allowed to obtain upsets in a single cell of 65nm SRAM integrated circuits and to improve the accuracy of determining of their laser radiation sensitivity parameters.

Лазерные методы диагностики микроэлектронных структур (МЭС) основаны на способности сфокусированного лазерного излучения (ЛИ) инициировать в них ту или иную электрическую реакцию в цепи питания или входах/выходах [1, 2]. За последние 15 лет характерные размеры элементов структур уменьшились с 250 нм до 22 нм, в то же время дифракция света ограничивает минимальный размер пятна фокусировки лазерного пучка (пространственное разрешение) величиной  $\approx \lambda_0/NA$ , где  $\lambda_0$  – длина волны,  $NA$  – числовая апертура пучка. В связи с этим, дальнейшее развитие методов лазерной диагностики МЭС требует уменьшения пятна фокусировки ЛИ. Для КМОП ИС из-за возрастания

поглощения длина волны не может быть существенно уменьшена ниже 1 мкм, т.е. единственно возможным путем улучшения пространственного разрешения является увеличение числовой апертуры  $NA$  лазерного пучка. Этого можно достичь путем помещения твердотельной иммерсионной линзы (Solid Immersion Lens – SIL) на поверхность объекта [3].

В данной работе изучалась возможность использования SIL для распространения лазерных методов на субмикронные ИС. В качестве источника ЛИ использовался пикосекундный лазер, генерирующий импульсы с длиной волны 1064 нм, длительностью 70 пс и гауссовым профилем пучка, при этом поперечный размер пучка в фокусе составлял 2,5 мкм. Экспериментально наблюдались изменения логического состояния (одиночные сбои – ОС) ячеек памяти КМОП ОЗУ при воздействии сфокусированного ЛИ. В качестве объекта исследования было выбрано тестовое 65-нм статическое ОЗУ, поперечные размеры чувствительных к ОС областей которой по оценкам не превышают 0,35 мкм. Используемая длина волны лазерных импульсов 1064 нм позволила проводить воздействие на тестовое ОЗУ сквозь кремниевую подложку, что позволило исключить экранирующее влияние слоев металлизации.

Измерялась минимальная энергия лазерного импульса, приводящая к ОС в ячейке памяти исследуемого ОЗУ (порог ОС). В отсутствие SIL порог ОС составил 0,3 нДж, при этом даже при минимально возможном пятне фокусировки наблюдались сбои в нескольких соседних ячейках.

Для уменьшения диаметра пятна фокусировки и повышения разрешающей способности метода (получения сбоя в отдельной ячейке) была использована кварцевая полусферическая SIL с показателем преломления 1,4 диаметром 1 мм. Соответствующий расчет по методике [3] показывает, что данная линза позволяет уменьшить диаметр пятна фокусировки приблизительно в 1,5 раза (до 1,7 мкм). При использовании SIL стало возможным с помощью ЛИ с длиной волны 1064 нм получить однократные ОС в МЭС. Порог ОС составил при этом приблизительно 0,17 нДж (что существенно меньше, чем без SIL).

Таким образом, использование SIL позволяет расширить диапазон применимости лазерных методик для диагностики МЭС, выполненных по глубокой субмикронной технологии, а также повысить точность определения порога ОС при лазерном воздействии.

#### *Список литературы*

1. Маврицкий О.Б., Чумаков А.И. и др. // ПТЭ. 2016. №5. С.5.
2. Mavritskii O.B., Egorov A.N., et al. // Physics Procedia. 2015. V.73. P.183.
3. Ippolito S.B., Goldberg B.B., Ünlü M.S. // Journal of Applied Physics. 2005. V.97. P.053105.

С.Б. ОДИНОКОВ, Г.Р. САГАТЕЛЯН

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

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ СТЕКЛА**

Приведены результаты экспериментальных исследований на установке Caroline 15 PE операции плазмохимического травления силикатного стекла через маску из хрома двухуровневых фазовых дифракционных решеток. Период дифракционных решеток оставял  $d = 2,5 - 5$  мкм при скважности 0,5. Глубина канавок, формирующих двухуровневые фазовые дифракционные решетки, изменялась в пределах  $H = 300 - 1500$  нм. Экспериментально установлено наличие оптимальной, т.е. обеспечивающей наибольшую глубину канавок продолжительности процесса травления, а также показано, что селективность травления стекла относительно материала маски имеет экстремум – максимум при оптимальном парциальном сочетании плазмообразующего и химически активного газа.

S.B. ODINOKOV, H.R. SAGATELYAN

*Bauman Moscow State University*

## **EXPERIMENTAL STUDY ON PLASMA-CHEMICAL ETCHING OF GLASS**

The results of experimental studies of operation of plasma-chemical etching of silicate glass trough a chromium mask on “Caroline 15 PE” machine of two-level phase gratings are presented. The period of the diffraction gratings was  $d = 2.5 - 5 \mu\text{m}$  at a signal ratio of 0.5. The depth of the grooves forming the two-level phase diffraction gratings varied within the limits of  $H = 300 - 1500$  nm. The existence of optimal, i.e. securing the maximal depth of grooves, duration of etching process was experimentally established. Also it was shown that the selectivity of etching of the glass relative to the mask material has an extremum – the maximum responding the optimal partial combination of plasma and reactive gases.

Изготовление ДОО-ГОО возможно из заготовок фотошаблонов интегральных микросхем, в качестве оптического материала которых применяют кварц или силикатное стекло, которые уже содержат на одной из поверхностей хром толщиной  $h = 50 - 200$  нм. Имеющаяся информация по оборудованию, технологической оснастке и режимам выполнения операции плазмохимического травления (ПХТ) [1] не позволяет вычислять оптимальные режимы аналитически. Поэтому, для обеспечения



максимума селективности травления  $r$ , режимы ПХТ должны быть определены экспериментально.

Влияние времени травления  $t$  на итоговую глубину канавок  $H$  показано на рис. 1. Для нахождения оптимального режима ПХТ исследовали, как это видно из рассмотрения рис. 2, влияние соотношения расходов аргона и фреона на выходные параметры процесса ПХТ.

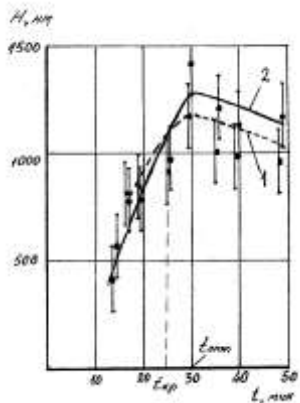


Рис. 1. Влияние времени травления  $t$  на глубину канавок  $H$  ДР при реализации операции ПХТ: 1 - после ПХТ; 2 - после кислотного травления

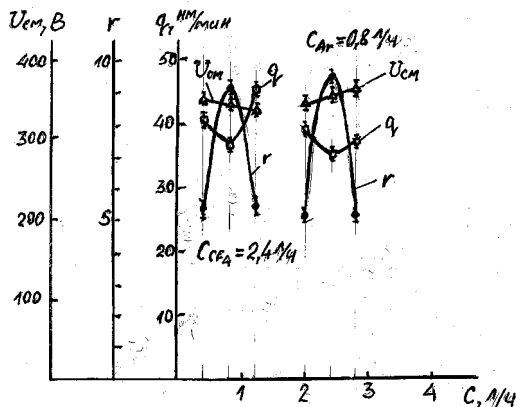


Рис. 2. Скорость травления стекла  $q$ , селективность травления стекла относительно хрома  $r$  и автосмещение  $U_{cm}$ , как функции от количества литров в час протекающих через расходомер плазмообразующего (аргон) и химически активного (фреон) газов

Работа выполнена в МГТУ им. Н.Э. Баумана при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения Соглашения о предоставлении субсидии № 14.577.21.0115 (идентификатор проекта RFMEFI57714X0115).

#### Список литературы

1. Одинокоев С.Б., Сагатеян Г.Р., Ковалев М.С. и др. Создание ДОЭ для формирования точечных эталонных изображений в оптических системах. // Компьютерная оптика. 2013. Т.37. №3. С.341-352.

М.И. ТРИБЕЛЬСКИЙ<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*  
<sup>2</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*  
<sup>3</sup>*Московский технологический университет (МИРЭА)*

## **ОСОБЕННОСТИ РАССЕЯНИЯ СВЕТА ЧАСТИЦАМИ С БОЛЬШИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ПРЕЛОМЛЕНИЯ**

Представлен краткий обзор последних теоретических и экспериментальных результатов автора по рассеянию света субволновыми частицами с большим коэффициентом преломления и малой диссипацией. Показано, что такое рассеяние сопровождается рядом качественно новых эффектов, ненаблюдаемых при значениях коэффициента преломления близких к единице. Эти эффекты открывают новые возможности для создания высоконелинейных гетерогенных наноструктур и других метаматериалов.

M.I. TRIBELSKY<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>*Lomonosov Moscow State University*  
<sup>2</sup>*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)*  
<sup>3</sup>*Moscow Technological University (MIREA)*

## **PECULIARITIES OF LIGHT SCATTERING BY PARTICLES WITH HIGH REFRACTIVE INDEX**

A brief survey of recent theoretical and experimental results of the author in light scattering by high refractive index subwavelength particles is presented. It is shown that the scattering is accompanied by a number of qualitatively new effects, which do not exist at the value of the refractive index close to unity. These effects provide physical grounds for numerous applications, especially those related to the design and engineering of high nonlinear heterogeneous nanostructures and other metamaterials.

Рассеяние плоской электромагнитной (ЭМ) волны частицами с большим показателем преломления и малыми диссипативными потерями сопровождается возбуждением острых резонансов Ми высокой добротности, которые приводят к существенным дифракционным искажениям электромагнитного поля как внутри частицы, так и вне ее. Однако, влияние этих резонансов на поле вне и внутри рассеивающей частицы существенно различно [1-5].

Показано, что вне частицы каждая парциальная мода может быть представлена как суперпозиция бесконечных каскадов резонансов Фано. Выяснена природа этих резонансов. Получены простые соотношения,

непосредственно выражающие параметры асимметричной линии Фано через фундаментальные параметры задачи рассеяния (размер частицы, волновое число падающего излучения и комплексный коэффициент преломления). Что касается поля внутри частицы, то там резонансы характеризуются традиционной лорентцевской формой линии, однако амплитуда резонансов может быть очень велика, а резонансы различных порядков могут существенно перекрываться. Это создает условия для гигантского (на порядки величин) усиления поля внутри такой частицы, а также для управления контрастом этого поля (рис. 1).

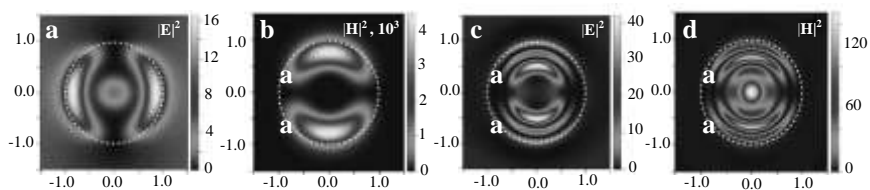


Рис. 1. Распределение ЭМ поля в экваториальном сечении сферы из GaP, облучаемой в вакууме плоской, линейно поляризованной волной с  $\lambda=532$  нм; все поля нормированы на соответствующие величины в падающей волне, а пространственный масштаб – на радиус сферы; резонансное возбуждение одной моды: (а) – (с), резонансное возбуждение одновременно нескольких перекрывающихся мод: (d)

#### Список литературы

1. Tribelsky M.I., Geffrin J.-M., Litman A., Eyraud C., Moreno F. Small Dielectric Spheres with High Refractive Index as New Multifunctional Elements for Optical Devices. // *Sci. Reports*. 2015. 5. 12288.
2. Tribelsky M.I., Miroshnichenko A.E. Giant In-Particle Field Concentration and Fano Resonances at Light Scattering by High-Refractive Index Particles. // *Phys. Rev. A*. 2016. 93. 053837.
3. Tribelsky M.I., Fukumoto Y. Laser Heating of Dielectric Particles for Medical And Biological Applications. // *Biomed. Opt. Express*. 2016. V.7. P.2781–2788.
4. Tribelsky M.I., Geffrin J.-M., Litman A., Eyraud C., Moreno F. Directional Fano Resonances at Light Scattering by a High Refractive Index Dielectric Sphere. // *Phys. Rev. B*. 2016. 94. 121110(R).
5. Kapitanova P., Ternovski V., Miroshnichenko A., Pavlov N., Belov P., Kivshar Yu., Tribelsky M. Giant field enhancement in subwavelength dielectric particles. Submitted to *Sci. Reports*.

**В.Г. ВОЛОСТНИКОВ**

*Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН*

**ОПТИЧЕСКИЕ ВИХРИ:  
ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ**

Рассмотрены роль и различные аспекты применения вихревых световых полей: контурный анализ изображений и синтез световых полей с заданным распределением интенсивности.

**V.G. VOLOSTNIKOV**

*Samara Branch of the Lebedev Physical Institute*

**OPTICAL VORTICES: THE PAST, PRESENT AND FUTURE**

Various role and aspects of vortical light field applications are considered: contour analysis and light field synthesis with predetermined intensity distribution.

Вихревые световые поля – это поля, обладающие ненулевой циркуляцией вектора потока световой энергии. Как физический объект, оптические вихри весьма естественно появились в [1, 2], где ставилась и решалась двумерная фазовая проблема в дифракционной зоне Френеля.

В данной работе показана связь между оптическими вихрями и дислокациями волнового фронта, или фазовыми сингулярностями. Исследована проблема существования световых полей, сохраняющих свою структуру с точностью до масштаба и вращения [3], или спиральных пучков.

Показано, что спиральные пучки являются фундаментом нового подхода для контурного анализа изображений. Суть этого подхода заключается в том, что операции проводятся не с плоской кривой, задаваемой контуром, а с определяемым ею спиральным пучком, поскольку между кривой и пучком существует взаимно-однозначное соответствие.

Спиральные пучки, в силу своей структурной устойчивости, всегда являются амплитудно-фазовыми, но не чисто фазовыми световыми полями. Это делает их неоптимальными для прикладных задач синтеза фазовых элементов, формирующих заданную структуру оптического излучения. Ставилась и решалась задача: “обменять” структурную устойчивость спирального пучка на возможность формирования заданного распределения интенсивности в определенной плоскости чисто

фазовым оптическим элементом. В основу положено использование фазы соответствующего спирального пучка в качестве нулевого приближения. Применение спиральных пучков для построения чисто фазовых элементов для фокусировки излучения в кривые predetermined формы оказалось крайне полезным инструментом [3]. На рис. 1 приведены результаты пяти итераций алгоритма Герчберга–Сэкстона по созданию фазового элемента, фокусирующего гауссов пучок в границу квадрата.

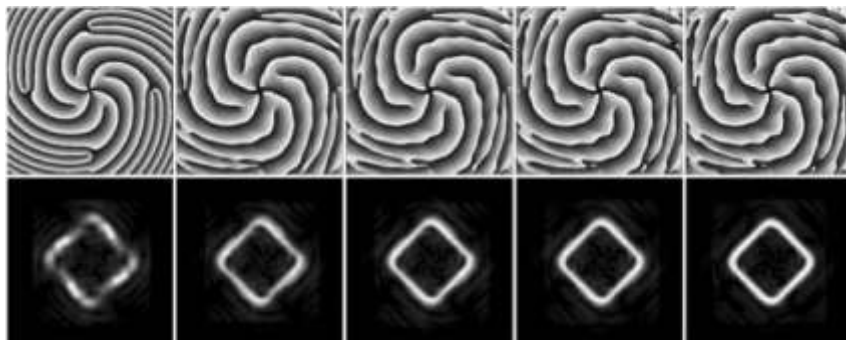


Рис. 1. Результаты пяти итераций алгоритма Герчберга–Сэкстона по созданию фазового элемента, фокусирующего гауссов пучок в границу квадрата

*Список литературы*

1. Abramochkin E.G., Volostnikov V.G., Malov A.N. About two dimensional phase retrieval problem in Fresnel diffraction zone. 1987. Dep.in VINITI 18.05.87. N 3773-B87.
2. Abramochkin E.G., Volostnikov V.G. // Optics Communications. 1989. V.74. P.144.
3. Волостников В.Г. Методы анализа и синтеза когерентных световых полей. М.: Физматлит, 2014.

В.А. БАРАЧЕВСКИЙ, М.М. КРАЮШКИН<sup>1</sup>, В.В. КИЙКО<sup>2</sup>  
*Центр фотохимии ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва*  
<sup>1</sup>*Институт органической химии им. Н.Д. Зелинского РАН, Москва*  
<sup>2</sup>*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

### **3D ПОБИТОВАЯ ОПТИЧЕСКАЯ ПАМЯТЬ НА ОСНОВЕ СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ**

Представлены результаты разработки фотохромных и фотохромогенных полимерных материалов для двухфотонной трехмерной (3D) побитовой оперативной и архивной оптической памяти, созданных на основе светочувствительных фотохромных дигетарилэтенов и фотофлуоресцентных хромонов, соответственно. Результаты спектрально-кинетического исследования этих материалов были использованы для разработки полимерных многослойных светочувствительных регистрирующих сред для оптических дисков с флуоресцентным считыванием информации. Представлено описание макета оптического устройства для записи, перезаписи и считывания оптической информации и результаты испытания на нем регистрирующих сред.

V.A. BARACHEVSKY, M.M. KRAYUSHKIN<sup>1</sup>, V.V. KYIKO<sup>2</sup>  
*Photochemistry Center of FSIS "Crystallography and Photonics" of the RAS, Moscow*  
<sup>1</sup>*Institute of Organic Chemistry of the RAS, Moscow*  
<sup>2</sup>*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*

### **3D BITWISE OPTICAL MEMORY BASED ON LIGHT-SENSITIVE ORGANIC COMPOUNDS**

This paper discusses own results on the development of photochromic and photochromogenic polymer materials for two-photon three-dimensional (3D) bitwise working and archival optical memory. These media were prepared with the use of light-sensitive photochromic dihetarylethenes and photofluorescent chromones, respectively. The results of spectral-kinetic studies of these materials were applied for the development of polymeric multilayer recording media for optical disks with fluorescent readout of information. The description of the breadboard set-up for optical data writing, rewriting, and readout on the designed recording media and the results of their testing are presented.

Совершенствование информационных технологий играет важную роль в развитии мирового сообщества. В связи с необходимостью увеличения информационной емкости и повышения быстродействия в регистрации и

обработке информации важное значение приобретает разработка нового поколения оптических носителей информации. Для решения этой задачи особую значимость имеет разработка 3D оптической памяти, поскольку она обеспечивает запись с максимальной плотностью, превышающей 1 Тбит/см<sup>3</sup>. В основе 3D оптической памяти лежит явление двухфотонного возбуждения светочувствительных систем, которое обеспечивает послойную запись оптической информации в многослойной регистрирующей среде с высоким пространственным разрешением. Технический результат ее применения состоит в увеличении объема записываемой информации в число раз, кратное количеству слоев диска.

Разработанная нами многослойная регистрирующая среда представляет собой структуру с чередующимися полимерными прозрачными волноводными, информационными и запирающими слоями (рис. 1), обеспечивающими за счет подбора показателей преломления послойное флуоресцентное считывание информации.

Целесообразность применения рассматриваемой структуры определяется следующими факторами: возможностью практически неограниченного увеличения количества информационных слоев, зависящего только от величины допустимой перефокусировки объектива оптической системы записи - считывания; возможностью использования широкого ряда светочувствительных веществ для информационных слоев; отсутствием повышенных требований к качеству поверхности и однородности материала оптического диска; исключением перекрестного влияния слоев при считывании информации.

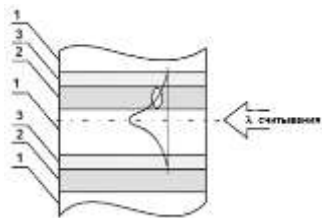


Рис. 1. Структура многослойной регистрирующей среды - полимерные слои:  
1 - волноводный,  
2 - информационный,  
3 - изолирующий



Рис. 2. Образец трехслойного оптического диска архивного типа

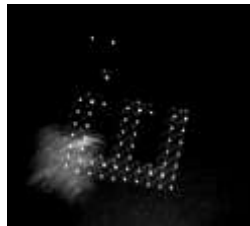


Рис. 3. Фрагмент тестовой записи в образце многослойной регистрирующей среды

Для создания информационных полимерных слоев 3D оптических дисков с реверсивной записью-стиранием информации и её флуоресцентным считыванием было использовано явление индуктивного переноса энергии возбуждения от органического флуорофора (феналенона) к циклической форме фотохромного диарилэтена. В основу разработки информационных слоев 3D оптических дисков архивного типа была положена идея необратимого фотохимического превращения нелюминесцирующего хромона во флуоресцирующий фотопродукт.

С использованием пилотного технологического оборудования получен образец трехслойного оптического диска для архивного хранения информации (рис. 2).

Для исследования функциональных свойств образцов регистрирующих сред и многослойных оптических дисков на их основе была разработана и собрана экспериментальная установка. Основой установки является твердотельный лазер с диодной накачкой на кристалле  $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ , который работает в высокочастотном импульсно-периодическом режиме: длина волны излучения 1064 нм, частота повторения импульсов - 0-11 кГц, энергия импульса - 0,2 мкДж, длительность импульса - 5 нс. Излучение основной частоты каскадно преобразуется во вторую и третью гармоники. Сфокусированный оптической системой пучок попадает на образец, установленный на устройстве позиционирования с возможностью перемещения по трем осям. Считывание информации осуществляется при помощи фокусировки излучения лазерного диода, излучающего на длине волны 410 нм в волноводный слой образца, посредством асферической линзы, которая установлена на устройстве позиционирования, обеспечивающем перемещение в поперечном к структуре слоев направлении. Изображение записанных объектов проецируется через спектральный светоделитель, при помощи оптической системы состоящей из объектива и тубусной линзы на ПЗС матрицу камеры.

На рис. 3 представлен фрагмент тестовой записи в многослойной среде образца оптического диска. Расстояние между отдельными точками - 5 мкм, размер точки по полувысоте - 0,5 мкм. Светящееся «облако» в углу символа «Е» - запись в другом слое.

Результаты исследования функциональных свойств полученного трехслойного оптического диска на созданном макете оптического устройства записи и считывания оптической информации свидетельствуют о возможности создания многослойных оптических дисков стандартного размера с информационной емкостью до 2,6 Тбайт.



С.М. АРАКЕЛЯН, А.О. КУЧЕРИК, С.В. КУТРОВСКАЯ,  
А.В. ОСИПОВ, К.С. ХОРЬКОВ, А.В. ИСТРАТОВ  
*Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых*

**ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ФОТОНИКИ:  
ПРОЯВЛЕНИЕ КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ  
В ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ  
И ЭЛЕКТРОПРОВОДИМОСТИ**

Квантовые состояния в нанокластерных структурах различного состава при регистрации оптических характеристик и прыжковой/туннельной электропроводимости рассмотрены как в экспериментальном, так и в теоретическом аспектах. Обсуждаются возможные механизмы их проявления в системах, синтезированных с помощью различных используемых нами методов, в т.ч. лазерной абляции вещества с поверхности твердого тела и в коллоидных системах. В наноструктурированных тонких пленках на твердой подложке продемонстрирована возможность направленного изменения их свойств и развитие квантово-размерных эффектов, которые реализуются в топологических объектах разного состава. Проанализированы особенности оптических и электрофизических свойств таких гранулированных наноструктур, важные для приложений в фотонике.

S.M. ARAKELIAN, A.O. KUCHERIK, S.V. KUTROVSKAYA,  
A.V. OSIPOV, K.S. KHORKOV, A.V. ISTRATOV  
*Stoletovs Vladimir State University*

**TOPOLOGICAL UNITS OF PHOTONICS:  
MANIFESTATION OF QUANTUM DIMENSION EFFECTS  
IN OPTICAL CHARACTERISTICS  
AND ELECTRICAL CONDUCTIVITY**

Quantum states in nanocluster structures of different composition, measured in both optical characteristics and jump/tunneling conductivity, are considered in experimental and theoretical aspects. The possible mechanisms of their manifestation in system fabricated by different methods, used by us including laser ablation of material from the surface of the solid body and in colloidal systems, are discussed. In nanostructured thin films on substrates we obtained the ability to change their properties under development of quantum dimensional effects for the topological objects of different composition. The analysis of the optical and electrophysical properties for granular nanostructures is carried out, being principal for applications in photonics.

1. Современная фемтонанопотоника является фундаментальной основой для создания оптоэлектронных устройств нового поколения, в которых реализуются квантово-размерные эффекты, в частности в оптических и электрофизических характеристиках благодаря сложной/управляемой топологии лазерно-индуцированных нанокластерных систем [1].

Нами показано, что методы лазерной модификации поверхности и синтеза тонкопленочных наноматериалов разного состава позволяют наблюдать макроскопические квантовые явления для наноструктурированных/кластерных объектов. Проведены эксперименты по управляемой наномодификации различных систем, демонстрирующие физические свойства, существенно отличающиеся от исходных массивных образцов. В таких сильно неоднородных наноструктурах получены эффекты квантовой корреляции (как в оптике, так и в электропроводимости) при комнатных температурах.

2. В эксперименте измерены различные зависимости для оптического пропускания и спектральных характеристик тонкопленочных биметаллических (Au+Ag) наноструктур, в т.ч. пространственно периодических и фрактального типа, демонстрирующие исключительную чувствительность к топологическим параметрам используемого образца.

3. При исследовании электрофизических характеристик нанокластерных структур обнаружена прыжковая/туннельная проводимость. Полученное уменьшение электропроводимости в подобных кластерных наноструктурах с проводящими контактами демонстрирует тенденцию к сверхпроводимости. Подобные кластерные структуры на поверхности твердого тела являются, во-первых, вполне стабильными, при комнатных температурах и, во-вторых, в них могут реализовываться различные (нефононные) механизмы спаривания электронов. Ряд из них обсуждается в настоящем докладе.

4. Проведённые нами исследования позволяют надеяться на создание на новых физических принципах элементов и систем фотоники и оптоэлектроники в различных гибридных схемах, в т.ч. для решения задач квантовой обработки информации с помощью наноструктур с введёнными в них резонансными атомами.

#### *Список литературы*

1. Аракелян С.М., Кучерик А.О., Прокошев В.Г., Рау В.Г., Сергеев А.Г. Введение в фемтонанопотонику: фундаментальные основы и лазерные методы управляемого получения и диагностики наноструктурированных материалов /под общ. ред. С.М. Аракеляна. М.: Логос, 2015.

А.И. МАЙМИСТОВ<sup>1,2</sup>, Е.И. ЛЯШКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет),  
Долгопрудный

## НЕЛИНЕЙНЫЕ ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВОЛНЫ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ДИЭЛЕКТРИКА И ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ИЗОЛЯТОРА

Исследованы поверхностные волны, распространяющиеся вдоль границы раздела изотропного нелинейного диэлектрика и топологического изолятора. Получено дисперсионное соотношение для таких волн, которые представляются суперпозицией ТЕ- и ТМ-волн. Найдены выражения для мощности, переносимой поверхностной волной. Из полученной зависимости следует существование порогового значения мощности. Это доказывает, что линейная поверхностная волна не существует.

A.I. MAIMISTOV<sup>1,2</sup>, E.I. LYASHKO<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudnyi

## THE NONLINEAR SURFACE WAVES ON THE INTERFACE BETWEEN DIELECTRIC AND TOPOLOGICAL INSULATOR

The surface waves propagating along interface between a nonlinear dielectric and linear topological insulator are studied. The dispersion relations for these waves are derived. The surface waves are the superposition of the TE and TM waves. Analytical expression for power carried surface waves is found. The threshold power existence follows from this expression. That establishes the statement that a linear surface wave is not available.

Одной из областей современной физики является создание и изучение новых материалов. Хорошо известными примерами таких материалов являются фотонные кристаллы и композитные искусственные среды (или метаматериалы), которые проявляют весьма необычные электродинамические свойства [1]. Среди новых материалов, привлекающих большое внимание в физике конденсированных сред, надо отметить класс сред, известных как топологические изоляторы (ТИ) [2, 3]. К их числу относятся кристаллы  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ,  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ,  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ , легированные Fe. Исследование ТИ оптическими методами, так же как и определение

различных оптических (в общем случае электромагнитных) характеристик этих материалов стало важной задачей оптики.

В настоящей работе рассмотрено распространение поверхностной волны вдоль границы раздела ТИ и диэлектрика. Диэлектрическая среда предполагается нелинейной (нелинейность керровского типа). В силу планарной симметрии электромагнитные волны можно разделить согласно их поляризации на ТЕ- и ТМ-волны. Но из-за нетривиальных граничных условий ТЕ- и ТМ-волны перемешиваются, так что вдоль границы раздела распространяется некоторая гибридная волна. Получено дисперсионное соотношение для этой поверхностной волны (рис. 1а), которое в частном случае приводит к обычным дисперсионным соотношениям отдельно для каждого типа поляризации, если константу магнитоэлектрического взаимодействия положить равной нулю. Мощность, переносимая поверхностной волной, рассчитана как функция эффективного показателя преломления. Из полученной зависимости следует наличие порогового значения мощности, что делает невозможным существование линейной поверхностной волны.

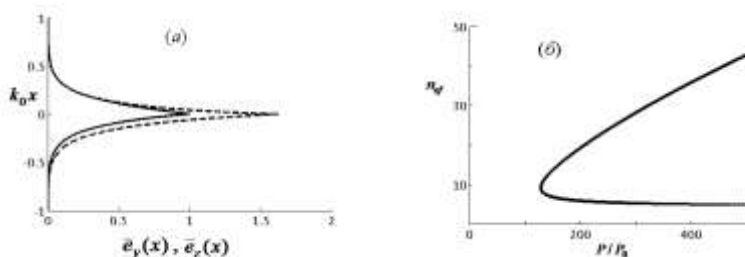


Рис. 1. Поперечное распределение компонент электрического поля поверхностной ТМ волны (а), зависимость эффективного показателя преломления от относительной мощности волны (б) [4]

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 15-02-02764).

#### Список литературы

1. Tutorials in Metamaterials / Ed. by M.A. Noginov, V.A. Podolskiy. London, N.Y.: Taylor and Francis Group, LLC / CRC Press, 2012.
2. Hasan M.Z., Kane C.L. // Rev.Mod.Phys. 2010. V.82. P.3045.
3. Qi X.-L., Hughes T.L., Zhang S.-C. // Phys.Rev. B. 2008. V.78. P.195424
4. Маймистов А.И., Ляшко Е.И. // Оптика и спектроскопия. 2016. Т.121. С.671.

**В.А. МАКАРОВ, В.М. ПЕТНИКОВА**

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

## **АДИАБАТИЧЕСКАЯ МОДУЛЯЦИЯ КНОИДАЛЬНОЙ ВОЛНЫ БРИЗЕРОМ АХМЕДИЕВА**

В адиабатическом приближении аналитически решена неинтегрируемая задача нелинейного взаимодействия кноидальной волны – «быстрой» компоненты векторного светового поля с периодическим по времени и локализованным в пространстве управляющим сигналом в форме бризера Ахмедиева - «медленной» компонентой того же поля.

**V.A. MAKAROV, V.M. PETNIKOVA**

*Lomonosov Moscow State University*

## **ADIABATIC MODULATION OF CNOIDAL WAVE BY AKHMEDIEV BREATHER**

The problem of nonlinear interaction of a cnoidal wave – a “fast” component of vector light field with periodic in time and localized in space control signal in the form of Akhmediev breather – a “slow” component of the same field is analytically solved in the adiabatic approximation.

Нелинейное распространение плоской эллиптически поляризованной световой волны через изотропную нелинейную гиротропную среду описывается неинтегрируемой системой нелинейных уравнений Шредингера (НУШ) [1], актуальной и в других областях физики. С использованием адиабатического приближения были получены приближенные решения этой системы, соответствующие амплитудной и частотной модуляции «быстрой» компоненты поля – кноидальной волны «медленной» компонентой поля с ортогональной поляризацией в форме кноидальной волны или солитонов [1], недавно проведено обобщение адиабатического приближения на случай больших времен взаимодействия [2]. Это обобщение необходимо использовать для описания нелинейного взаимодействия «быстрой» кноидальной волны с различными периодическими по времени решениями НУШ, что и сделано в настоящей работе, где в качестве «медленной» компоненты рассмотрен бризер Ахмедиева. Получены аналитические выражения для модуляции амплитуды  $a(t, z)$  и мгновенной частота  $\partial\varphi(t, z)/\partial t$  «быстрой»

компоненты  $A_{fast}(t, z) = a(t, z) \operatorname{cn}[\varphi(t, z), \mu]$  бризером  $A_{slow}(t, z)$ .  
Здесь  $\operatorname{cn}(x, \mu)$  - эллиптический косинус с модулем  $\mu$ . Найдены условия  
устойчивого распространения полученного решения.

На рис. 1 показаны амплитудно-частотная модуляция кноидальной  
волны, ее аргумент  $\varphi(t, 0)$  и бризер Ахмедиева  $A_{slow}(t, 0)$ .

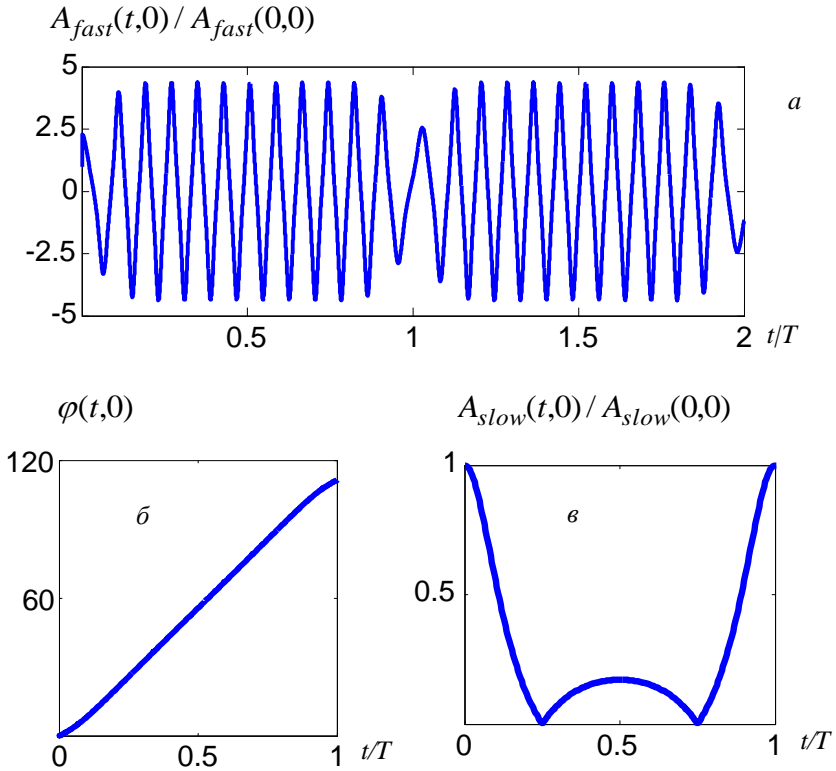


Рис. 1. Зависимости  $A_{fast}(t,0)/A_{fast}(0,0)$  (а),  $\varphi(t,0)$  (б) и  $A_{slow}(t,0)/A_{slow}(0,0)$  (в)  
от времени в плоскости  $z=0$ ;  $T$  - период бризера Ахмедиева

*Список литературы*

1. Makarov V.A., Petnikova V.M., Shuvalov V.V. // Opt. Express. 2014. 22(22), 26607
2. Макаров В.А., Петникова В.М., Шувалов В.В. // Квантовая электроника. 2016. 46(6). 578.

М.В. МЕЛЬНИК, А.Н. ЦЫПКИН, С.А. КОЗЛОВ

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ ВРЕМЕНИ КОГЕРЕНТНОСТИ СУПЕРКОНТИНУУМА ОТ КОЭФФИЦИЕНТА ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИИ**

В работе продемонстрирована и теоретически проанализирована зависимость времени когерентности спектрального суперконтинуума, генерируемого с помощью фемтосекундных лазерных импульсов с различными параметрами в диэлектрических материалах с определенными нелинейными и дисперсионными характеристиками от коэффициента фазовой модуляции генерируемого импульса.

M.V. MELNICK, A.N. TSYPKIN, S.A. KOZLOV

*ITMO University, Saint-Petersburg*

## **THEORETICAL ANALYSIS OF THE SUPERCONTINUUM COHERENCE TIME DEPENDENCE ON PHASE MODULATION COEFFICIENT**

In this work the dependence of the spectral supercontinuum generated by femtosecond laser pulses with different parameters in dielectric materials with certain nonlinear and dispersion characteristics coherence time on the generated pulse phase modulation coefficient was demonstrated and theoretically analyzed.

В наше время, большое количество исследований ведется с целью разработки источников суперконтинуума для дальнейшего практического применения [1-3]. Для всех этих приложений необходимо детальное описание характеристик и параметров генерируемого суперконтинуума, таких как: спектральный диапазон, стабильность, устойчивость к помехам, нелинейные эффекты, что лежат в основе уширения спектра, а также когерентные свойства. Последние могут существенно влиять на его рабочие характеристики в качестве источника излучения.

В данной работе для расчета времени когерентности суперконтинуума от различных параметров среды и исходного импульса используется метод корреляции первого порядка. Этим методом в работе определяется время когерентности генерируемого спектрального суперконтинуума [4].

На рис. 1 приведен результат зависимости времени когерентности спектрального суперконтинуума и коэффициента фазовой модуляции на

примере плавленного кварца после прохождения 10 мм среды от центральной длины волны излучения на входе в среду.

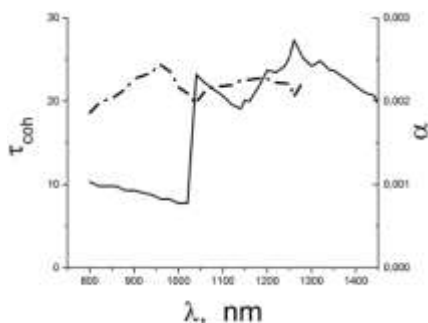


Рис. 1. Зависимость времени когерентности спектрального суперконтинуума и коэффициента фазовой модуляции на выходе из плавленного кварца длиной 10 мм от центральной длины волны импульса на входе с длительностью  $\tau_p = 80$  фс и пиковой интенсивностью  $I = 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>

Из рис. 1 видно, что при увеличении длины волны время когерентности уменьшается, однако в области нулевой дисперсии среды происходит резкое увеличение данного параметра. Теоретический анализ показал, что время когерентности линейно chirпированного импульса обратно пропорциональна его коэффициенту фазовой модуляции:

$$\tau_{coh} \sim \frac{1}{\omega_0 \alpha_0}, \quad (1)$$

где  $\omega_0$  – центральная частота излучения на входе в среду,  $\alpha_0$  – коэффициент линейной фазовой модуляции, а  $\tau_{coh}$  – время когерентности спектрального суперконтинуума.

#### Список литературы

1. Hartl I., et al. Ultrahigh-resolution optical coherence tomography using continuum generation in an air–silica microstructure optical fiber. // Opt. Letters. 2001. V.26. No 9. P.608-610.
2. Ye J., Schnatz H., Hollberg L.W. Optical frequency combs: from frequency metrology to optical phase control. // Selected Topics in Quant. Elect., IEEE Journal of. 2003. V.9. No 4. P.1041-1058.
3. Tsyarkin A.N., Putilin S.E., Mel'nik M.V., Kozlov S.A., Klykov S.S. The transmission of 45 bits of information by a pair of interfering femtosecond pulses with superwide spectra. // Journal of Optical Technology. 2013. V.80. No 7. P.466-469.
4. Melnik M.V., Tsyarkin A.N. The calculation of the coherence time of spectral supercontinuum at the output of the fused silica with different parameters of the initial pulse. // SPIE Optical Engineering+ Applications, 2014. P.92000W-92000W-7.



Е.В. КАЗАНЦЕВА

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ УЕДИНЁННЫХ ВОЛН  
В БРЭГГОВСКОЙ РЕШЁТКЕ, СОДЕРЖАЩЕЙ  
ПРОСТРАНСТВЕННУЮ НЕОДНОРОДНОСТЬ  
ПОЛЯРИЗАЦИИ НЕЛИНЕЙНОЙ РЕЗОНАНСНО  
ПОГЛОЩАЮЩЕЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СРЕДЫ**

Рассмотрена модель распределённого брэгговского зеркала, учитывающая неоднородность плотности резонансных атомов нелинейной среды, для того, чтобы исследовать распространение в такой среде поляритонов – связанных уединённых волн поляризации и напряжённости электрического поля. В численном моделировании стационарное решение в виде уединённой волны использовалось в качестве входного импульса при исследовании прохождения и рассеяния его на дефектах плотности. В протяжённом дефекте типа микрополости световой импульс распространяется, отражаясь от границ и частично рассеиваясь.

E. V. KAZANTSEVA

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

**PROPAGATION OF SOLITARY WAVES IN A BRAGG  
GRATING WHICH CONTAINS A LOCALIZED SPATIAL  
INHOMOGENEITY OF POLARIZATION OF NONLINEAR  
RESONANTLY ABSORBING PERIODIC MEDIUM**

A model of distributed Bragg grating is considered with taking into account inhomogeneity of density of resonant atoms in nonlinear medium to investigate numerically the propagation of polaritons – coupled solitary waves of polarization and electric field in such medium. In the numerical simulation a solitary wave solution is used as an input pulse to study the propagation and scattering of the solitary waves at the density defects. Inside wide defect - microcavity the light pulse propagates by reflecting from its boundaries, where its radiation partly scatters.

Распространение поляритонной волны в нелинейной резонансно поглощающей брэгговской решётке описывается волновыми уравнениями для медленно меняющихся огибающих прямой и обратной волн с нормированными амплитудами  $e_1$  и  $e_2$  напряжённостей электрического поля, взаимодействующих через поляризацию нелинейной среды, и

уравнения для нормированной амплитуды  $p$  поляризации среды. Уравнения для волн были дополнены параметром  $\gamma(\zeta)$ , определяемым функцией, характеризующей неоднородность поляризации среды, представляющей собой однородный диэлектрик, содержащий периодически расположенные тонкие плёнки с металлическими наночастицами [1]:

$$i\left(\frac{\partial e_1}{\partial \zeta} + \frac{\partial e_1}{\partial \tau}\right) + \delta e_1 = -\gamma(\zeta)p, \quad i\left(\frac{\partial e_2}{\partial \zeta} - \frac{\partial e_2}{\partial \tau}\right) - \delta e_2 = \gamma(\zeta)p, \\ i\frac{\partial}{\partial \tau}p + \Delta p + \mu|p|^2 p = -(e_1 + e_2). \quad (1)$$

В численном моделировании не учитывались эффекты частотной и пространственной отстройек ( $\Delta = \delta = 0$ ), а параметр нелинейности  $\mu = 1$ . Амплитуда и скорость распространения уединённой волны характеризуются значением параметра  $\alpha$ , см. работу [1]. Неоднородность распределения плотности наночастиц в брэгговской решётке может быть описана с помощью разных типов дефектов: микрополости ( $\gamma(\zeta) = 0$ ), углубления в виде желобка ( $\gamma(\zeta) < 1$ ) и полоскового дефекта ( $\gamma(\zeta) > 1$ ). Значение  $\gamma(\zeta) = 1$  соответствует бездефектной области. На рис. 1 проиллюстрированы рассмотренные типы дефектов.



Рис. 1. Распределение плотности наночастиц в различных типах дефектов: микрополости (а), желобкообразном дефекте (б), полосковом дефекте (в)

В численном моделировании не наблюдалось полного захвата излучения проходящей уединённой волны дефектами в виде желобка и полосковыми дефектами. Кратковременный захват медленной уединённой волны происходит внутри протяжённого дефекта типа микрополости. Численное исследование уравнений модели проводилось автором на постдок-стажировке в США в Университете Аризоны на кафедре математики.

#### Список литературы

1. Kazantseva E.V., Maimistov A.I. // Phys. Rev. A. 2009. V.79. 033812.

А.В. ШЕСТЕРИКОВ, М.Ю. ГУБИН, М.Г. ГЛАДУШ<sup>1</sup>,  
А.В. ПРОХОРОВ

*Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых*  
<sup>1</sup>*Институт спектроскопии РАН, Троицк*

## **ФОРМИРОВАНИЕ СУБПИКОСЕКУНДНЫХ ПЛАЗМОННЫХ ИМПУЛЬСОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОЛЛЕКТИВНЫХ ЭФФЕКТОВ В ВОЛНОВОДНОМ СПАЗЕРЕ**

Рассмотрены кооперативные эффекты, возникающие в условиях сосредоточенной модели для плотного ансамбля полупроводниковых квантовых точек вблизи границы раздела металл-диэлектрик и приводящие к формированию субпикосекундных плазмонных импульсов. Показано, что выбором значений комплексного показателя преломления для искусственной диэлектрической среды-носителя можно существенно повысить эффективность формирования плазмонных импульсов в рассматриваемой модели. Обсуждается возможность генерации спектрального суперконтинуума плазмон-поляритонных мод в пространственно-распределённой модели волноводного спазера.

A.V. SHESTERIKOV, M.Yu. GUBIN, M.G. GLADUSH<sup>1</sup>,  
A.V. PROKHOROV

*Stoletovs Vladimir State University*  
<sup>1</sup>*Institute for Spectroscopy of the RAS, Troitsk*

## **FORMATION OF SUB-PICOSECOND PLASMON PULSES VIA COOPERATIVE EFFECTS IN WAVEGUIDE SPASER**

The problem of sub-picosecond plasmon pulses formation in metal/dielectric interface during the process of the cooperative decay of excited quantum dots placed in the dielectric layer near the metal surface is considered. The approach for choosing specific dielectric host medium to increase the energy transmission efficiency of collective excitations of quantum dots into plasmonic modes in metal/dielectric waveguide is proposed. The possibility of generation a spectral supercontinuum of plasmon-polariton waves in a spatially distributed model of waveguide spaser is discussed.

Формирование плазмонных импульсов возможно в процессе коллективного распада экситонов в ансамбле возбужденных квантовых точек (КТ) с концентрацией  $N$ , расположенных в слое диэлектрика вблизи металлической пластины (рис. 1а), размер которых выбирается из условия

равенства частоты перехода в КТ и плазмонной частоты металлической пластины  $\omega_p$  (рис. 1б). Динамика формирования плазмонных импульсов (рис. 1в) определяется характерным временем установления квантовых корреляций  $t_R = \sqrt{2\hbar\epsilon_d\epsilon_0 \frac{\partial S_n(\bar{\omega})}{\partial \bar{\omega}} / (S_n(\bar{\omega})\mu_{12}^2 N)}$  между КТ и выражается через параметр Бергмана  $S_n(\bar{\omega}) = \text{Re}(\epsilon_d / (\epsilon_d - \epsilon_m(\bar{\omega})))$  для границы раздела с  $\epsilon_d$  диэлектрика и  $\epsilon_m(\bar{\omega}) = 1 - \omega_p^2 / (\bar{\omega}^2 + i\gamma_p\bar{\omega})$  металла и с учетом столкновительной частоты  $\gamma_p$ , а также плазмонной частоты  $\bar{\omega} = \omega_p / \sqrt{2}$ . Особенность управляющего уравнения заключается в появлении дисперсионной и диссипативной поправок за счет учета локального отклика диэлектрика, что позволяет управлять скоростью спонтанной релаксации КТ и частотным спектром формируемых импульсов. Таким образом, в работе представлен способ генерации коротких плазмонных импульсов без использования оптической схемы возбуждения, что может найти свое применение в плазмонных схемах обработки информации.

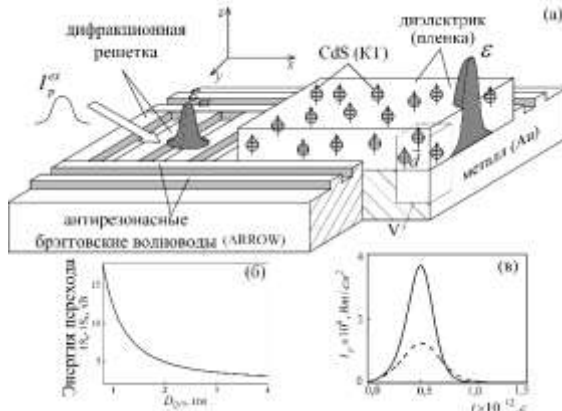


Рис. 1. Схема формирования плазмонных импульсов в золото/диэлектрик волноводе с накачкой CdS КТ [2] (а); зависимость энергии перехода от размера КТ (б); профили плазмонных импульсов при  $N = 2.83 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$  для  $N_a = 200 \text{ КТ}$  с размером  $D_{QD} = 1.56 \text{ нм}$  для нескомпенсированной (штриховая линия) и скомпенсированной (сплошная линия) скоростей затухания в КТ [1] (в)

Список литературы

1. Shesterikov A.V., Gubin M.Yu., Gladush M.G., Prokhorov A.V. // JETP. 2017. in press.

Т.Н. БАХВАЛОВА, И.В. ГЛАДЫШЕВ, Н.Г. ШАНДРЮК  
*Московский технологический университет (МИРЭА)*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРЬ В ИНТЕГРАЛЬНОМ ОПТИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ НА БАЗЕ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПЛАТФОРМ**

С помощью САПР OptoDesigner 5 разработки PhoeniX Software, Голландия, проведено моделирование и сравнение интегральных волноводных элементов, выполненных на базе трех наиболее перспективных материалов: InP, Si и Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

T.N. BAKHVALOVA, I.V. GLADYSHEV, N.G. SHANDRYUK  
*Moscow Technological University (MIREA)*

## **MODELING PROPAGATION LOSS IN INTEGRATED OPTICAL WAVEGUIDES BASED ON VARIOUS MATERIAL PLATFORMS**

We present the modeling results and comparison of the integrated waveguide elements based on the three most advanced materials: InP, Si and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> by CAD tool OptoDesigner 5 from PhoeniX Software.

В настоящее время три технологические платформы на основе InP, Si и Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (TriPleX) являются коммерчески доступными для многоцелевых применений фотонных интегральных схем. Преимущества и слабые стороны использования этих материалов рассмотрено в статье [1]. При моделировании использовались библиотечные элементы, что позволит в дальнейшем создавать сложные функциональные конструкции. Моделирование проводилось с помощью программного продукта OptoDesigner 5 от PhoeniX Software. Сравнивались потери в прямом интегральном оптическом волноводе, в изгибе волновода с разным радиусом кривизны и перекачка энергии при близком расположении волноводов в зависимости от расстояния между волноводами (рис. 1 и 2) при помощи метода 2D FDTD. Также рассматривалась возможность создания устройств ввода и вывода излучения из волокна в интегральный волновод. Материал волновода и оболочки варьировался в зависимости от выбранной технологической платформы. По результатам моделирования определено, что пассивные элементы на основе кремниевой

технологической платформы имеют меньшие потери, что хорошо согласуется с литературными данными.

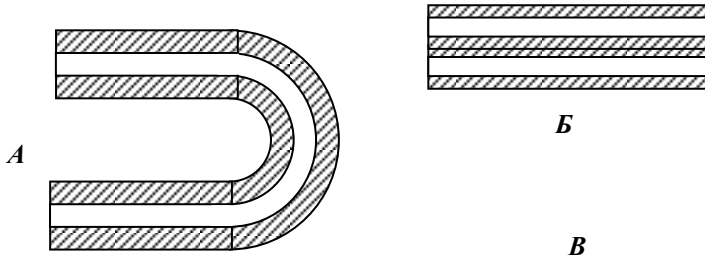


Рис. 1. Пассивные элементы различной геометрии: поворот волновода на 180 градусов (а); перекачка энергии в соседний волновод (б); прямой волновод (в)

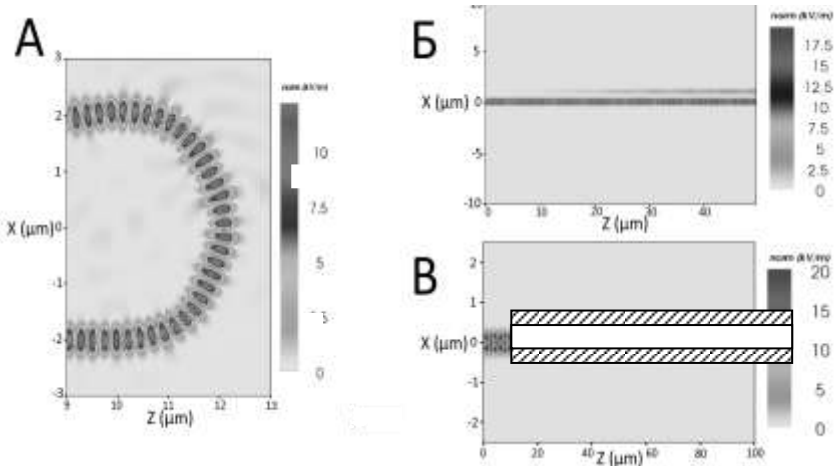


Рис. 2. Результаты моделирования в OptoDesigner 5 от Phoenix Software: поворот волновода на 180 градусов (а); перекачка энергии в соседний волновод (б); прямой волновод (в)

#### Список литературы

1. Белкин М.Е., Кудж С.А., Сигов А.С. Новые принципы построения радиоэлектронной аппаратуры СВЧ-диапазона с использованием радиопотонной технологии // Электронное сетевое издание «Российский технологический журнал». 2016. Т.4. №1 (10). С.1-20.

Е.И. ЛЯШКО<sup>2</sup>, А.И. МАЙМИСТОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет),  
Долгопрудный

## **ДИСПЕРСИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАНАРНОГО ГИПЕРБОЛИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА С НЕЛИНЕЙНОЙ СЕРДЦЕВИНОЙ**

Теоретически рассмотрены направленные ТМ моды симметричного планарного волновода. Сердцевина волновода представляет собой изотропный диэлектрик с кубично нелинейным откликом, обкладки представлены гиперболической средой. Для мод волновода получены дисперсионные соотношения, рассмотрены случаи фокусирующей и дефокусирующей сердцевины. Показано, что при соответствующем условии на диэлектрические проницаемости сред для каждой нелинейной ТМ моды определены две частоты отсечки. В случае дефокусирующей сердцевины постоянная распространения моды с увеличением интенсивности поля достигает нулевого значения.

E.I. LYASHKO<sup>2</sup>, A.I. MAIMISTOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudnyi

## **DISPERSION CHARACTERISTICS OF A SLAB HYPERBOLIC WAVEGUIDE WITH NONLINEAR CORE**

Guided TM waves in a symmetric slab waveguide are investigated theoretically. The waveguide consists of isotropic dielectric core with cubic nonlinear response placed between the hyperbolic media. The dispersion relations are found for the TM modes, cases of self-focusing and defocusing core medium are considered. It is shown that under certain conditions for dielectric constants each nonlinear TM mode has two cutoff frequencies. In case of self-defocusing core mode propagation constant could reach zero value with field intensity growth.

Под гиперболической средой понимают одноосную анизотропную среду, характеризующуюся тензором диэлектрической проницаемости (или магнитной восприимчивости), главные компоненты которого имеют противоположные знаки. Благодаря этой особенности гиперболические среды рассматриваются как перспективные компоненты плазмонных направляющих структур или волноводов, позволяющие, к примеру, изменять скорость распространения направленной моды.

В работе рассматривается планарный волновод, образованный изотропной диэлектрической пластиной заданной толщины, расположенной между двумя гиперболическими средами. Диэлектрическая проницаемость сердцевины представима в виде:  $\varepsilon_i^{nl} = \varepsilon_i + \varepsilon_K |\vec{E}|^2$ . Оси анизотропии направлены перпендикулярно поверхностям раздела сред. В такой геометрии более интересен случай ТМ мод, являющихся необыкновенными волнами в обкладках волновода. ТМ волны удерживаются волноводом при  $\varepsilon_o < 0$ ,  $\varepsilon_e > 0$ .

Дисперсионное соотношение для направленных мод волновода связывает эффективный показатель преломления моды (постоянную распространения) с частотой излучения или толщиной волноводного слоя. На рис. 1 показаны дисперсионные кривые при  $\varepsilon_i > \varepsilon_e$  в случае дефокусирующей (a) и фокусирующей (b) среды сердцевины.

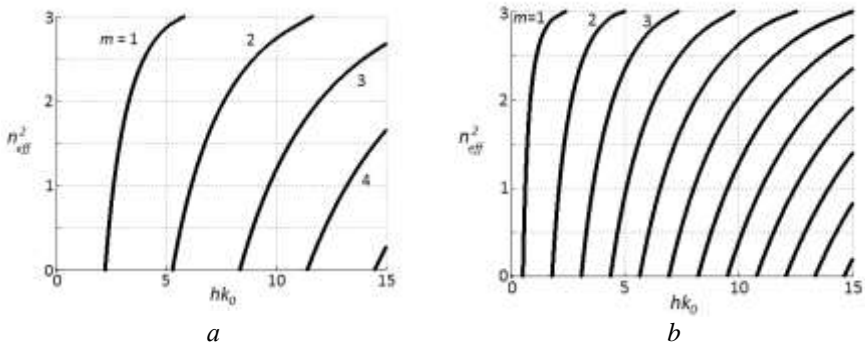


Рис. 1. Дисперсионные кривые для нелинейной ТМ волны:  $\varepsilon_K < 0$  (a),  $\varepsilon_K > 0$  (б)

Как видно из графиков, эффективный показатель преломления каждой моды изменяется в пределах  $0 < n_{eff}^2 < \varepsilon_e$ . Точки, в которых  $n_{eff}^2 = \varepsilon_e$ , являются дополнительными частотами отсечки. Таким образом, каждая ТМ волна удерживается волноводом только в определенном частотном диапазоне. Эффективный показатель преломления ТМ моды может принимать нулевое значение, что соответствует остановившейся в волноводе волне. В случае дефокусирующей среды сердцевины с ростом интенсивности поля происходит замедление излучения в волноводе, постоянная распространения моды уменьшается, в пределе достигая нулевого значения.



А.А. АКИМОВ, В.В. ИВАХНИК, В.И. НИКОНОВ

*Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева*

**АМПЛИТУДНЫЕ И ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧЕТЫРЕХВОЛНОВОГО  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТЕПЛОВОЙ  
НЕЛИНЕЙНОСТИ В СХЕМЕ С ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ  
ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ**

Проанализированы зависимости коэффициента отражения, пространственной селективности четырехволнового преобразователя излучения на тепловой нелинейности, расположенного в кольцевом резонаторе, от характеристик резонатора. Показано, что наличие положительной обратной связи по сигнальной и объектной волнам может в несколько раз повысить коэффициент отражения четырехволнового преобразователя излучения.

A.A. AKIMOV, V.V. IVAKHNIK, V.I. NIKONOV

*Samara National Research University*

**AMPLITUDE AND SPATIAL CHARACTERISTICS  
OF THE FOUR-WAVE RADIATION CONVERTER  
ON THERMAL NONLINEARITY IN THE SCHEME  
WITH POSITIVE FEEDBACK**

The dependences of the reflection coefficient, the spatial selectivity of the four-wave radiation converter on thermal nonlinearity located in a ring resonator on the resonator characteristics have been analyzed. It is shown that the presence of a positive feedback for both signal and reversed waves can increase the reflection coefficient of the four-wave radiation converter by several times.

Одним из способов повышения эффективности четырехволновых преобразователей излучения является наложение положительной обратной связи на объектную и сигнальную волны или на одну из этих волн. Для четырехволнового преобразователя излучения на керровской нелинейности реализация положительной обратной связи на объектную и сигнальную волны позволила на порядки повысить эффективность таких преобразователей [1]. Представляет интерес изучение влияния положительной обратной связи на амплитудные и пространственные характеристики четырехволнового преобразователя излучения на тепловой нелинейности. С этой целью был рассмотрен процесс

вырожденного четырехволнового взаимодействия на тепловой нелинейности в схеме с положительной обратной связью. Для реализации петли обратной связи использовался кольцевой резонатор, состоящий из полупрозрачного зеркала и двух сферических зеркал. Среда с тепловой нелинейностью располагалась между зеркалами резонатора. Через полупрозрачное зеркало излучение заводилось внутрь резонатора. Сферические зеркала осуществляли перенос пространственного распределения поля с одной грани нелинейного слоя на другую, обеспечивая положительную обратную связь, как по сигнальной, так и по обращенной волне.

Для описания процесса четырехволнового взаимодействия рассматривалось стационарное волновое уравнение. Пространственное распределение поля температуры в среде описывалось с помощью уравнения Пуассона. Использовались приближения заданного поля по волнам накачки, медленно меняющихся амплитуд и параксиальное приближение. Сигнальная волна представлялась в виде волны от точечного источника, расположенного на передней грани нелинейной среды.

Учитывая граничные условия на амплитуды взаимодействующих волн и неизменность температуры на гранях нелинейного слоя при малом коэффициенте отражения, было получено выражение для комплексной амплитуды объектной волны.

Для анализа эффективности процесса преобразования излучения были построены зависимости коэффициента отражения, выигрыша в мощности обращенной волны от коэффициентов отражения сферических зеркал. Показано, что при наличии положительной обратной связи можно достичь значений коэффициента отражения, превышающих значение коэффициента отражения в отсутствие кольцевого резонатора в несколько раз. Для оценки качества обращения волнового фронта падающего на нелинейную среду излучения используется полуширина полосы пространственных частот объектной волны. Показано, что наличие положительной обратной связи при малых коэффициентах отражения не влияет на полуширину полосы пространственных частот объектной волны. Построены зависимости полуширины полосы пространственных частот от коэффициентов отражения сферических зеркал в приближении больших коэффициентов отражения.

*Список литературы*

1. Ivakhnik V.V. // Samara State University Publisher. 2010. P.246.

В.В. ИВАХНИК, М.В. САВЕЛЬЕВ

*Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева***НЕСТАЦИОНАРНОЕ ЧЕТЫРЕХВОЛНОВОЕ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В ПРОЗРАЧНОЙ НАНОЖИДКОСТИ**

Проведен анализ пространственных и временных характеристик четырехволновых преобразователей излучения в прозрачной среде с учетом электрострикции и эффекта Дюфура в схемах со встречными и попутными волнами накачки. Показано, что такие преобразователи излучения вырезают пространственные частоты сигнальной волны вблизи пространственных частот волн накачки. Ширина вырезанных пространственных частот с течением времени уменьшается.

V.V. IVAKHNIK, M.V. SAVELYEV

*Samara National Research University***TRANSIENT FOUR-WAVE MIXING  
IN A TRANSPARENT NANOLIQUID**

Spatial and temporal characteristics of the four-wave radiation converters in a transparent medium with regard for the electrostriction and Dufour effect has been analyzed for schemes with opposite and concurrent pump waves. Shown that such radiation converters cut out spatial frequencies of the signal wave near spatial frequencies of the pump waves. Width of cut spatial frequencies decreases over time.

Настоящая работа посвящена изучению пространственно-временных характеристик четырехволнового преобразователя (ЧВП) излучения в прозрачной среде, состоящей из жидкости и растворенных в ней наночастиц, в схемах со встречными и попутными волнами накачки.

Система уравнений, описывающих изменение температуры  $\delta T$  и концентрации частиц  $\delta C$  в такой среде, в приближении линейной неравновесной термодинамики имеет вид [1, 2]

$$c_p \nu \frac{\partial \delta T}{\partial t} = D_{11} \nabla^2 \delta T + D_{12} \nabla^2 \delta C, \quad \frac{\partial \delta C}{\partial t} = D_{22} \nabla^2 \delta C + \gamma \nabla^2 I, \quad (1)$$

где  $c_p$  – удельная теплоемкость,  $\nu$  – плотность вещества,  $D_{11}$ ,  $D_{12}$ ,  $D_{22}$  и  $\gamma$  – коэффициенты теплопроводности, Дюфура, диффузии и электрострикции соответственно,  $I$  – интенсивность излучения.

С использованием уравнения Гельмгольца и материальных уравнений (1) в приближении заданного поля по волнам накачки и малого коэффициента отражения (преобразования) при разложении  $\delta T$  и  $\delta C$  в ряды Фурье [2] получены выражения, устанавливающие связь между временными зависимостями пространственных спектров четырех взаимодействующих волн при вырожденном, квазивырожденном четырехволновом взаимодействии в прозрачной двухкомпонентной среде с учетом электрострикции и эффекта Дюфура в схемах со встречными и с попутными волнами накачки. Показано, что зависимость проекции волновой расстройки от поперечных составляющих волновых векторов взаимодействующих волн определяет общий вид модуля пространственного спектра объектной волны, а наличие электрострикции и эффекта Дюфура – возникновение в модуле пространственного спектра волны с обращенным волновым фронтом (ОВФ) провалов, положения которых соответствуют направлениям распространения волн накачки.

Для характеристики пространственной селективности ЧВП излучения введены два параметра: полуширина полосы излучения пространственных частот, вырезанных ЧВП излучения, и ширина полосы наиболее эффективно преобразуемых пространственных частот.

В схеме со встречными волнами накачки показано, что с увеличением пространственной частоты время выхода модуля пространственного спектра волны с ОВФ на установившееся (стационарное) значение монотонно убывает. С течением времени полуширина полосы пространственных частот, вырезанных ЧВП, монотонно уменьшается, выходя на постоянное значение, что свидетельствует об улучшении качества ОВФ. Ширина полосы пространственных частот, наиболее эффективно преобразуемых квазивырожденным ЧВП излучения, с течением времени увеличивается.

В схеме с попутными волнами накачки показано, что образование провалов запаздывает по сравнению с образованием модуля пространственного спектра волны с ОВФ, обусловленного ненулевой проекцией волновой расстройки. При равных углах падения волн накачки на слой наножидкости показано, что видность провалов с течением времени возрастает, выходя на установившееся значение. Это значение уменьшается с ростом угла падения волн накачки.

*Список литературы*

1. Ivakhnik V.V., Savelyev M.V. // Physics Procedia. 2015. V.73. P.26-32.
2. Ivakhnik V.V., Savelyev M.V. // Computer optics. 2016. V.40 (3). P.322.

М.С. КУЛЯ, В.А. СЕМЕНОВА, А.С. ОБРЫВКИН, В.Г. БЕСПАЛОВ  
*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ГРУППОВОЙ И ФАЗОВОЙ СКОРОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВИХРЕВЫХ И КВАЗИБЕССЕЛЕВЫХ ПУЧКОВ**

В работе описывается численное моделирование распространения импульсных терагерцовых вихревых и квазибесселевых пучков в вакууме с помощью метода импульсной терагерцовой голографии с разрешением во времени. Данная техника позволяет получать двумерные распределения амплитудных и фазовых характеристик электрического поля для каждой спектральной компоненты, а также восстанавливать форму терагерцовой волны в полевом виде. В работе показано поведение волнового фронта в аспекте изменения групповой скорости волнового пакета в поперечном сечении спиральных и квазибесселевых пучков.

M.S. KULYA, V.A. SEMENOVA, A.S. OBRYVKIN,  
V.G. BESPALOV  
*ITMO University, Saint-Petersburg*

## **STUDY OF GROUP AND PHASE VELOCITIES OF THz PULSED VORTEX AND QUASI-BESSEL BEAMS**

The paper describes a numerical simulation of pulsed terahertz vortex and quasi-Bessel beams in a vacuum by the method of pulsed terahertz holography with time resolution. This technique allows obtaining two-dimensional distribution of the amplitude and phase characteristics of the electric field for each spectral component, as well as to reconstruct the shape of the terahertz wave in the time domain. The paper shows the behavior of the wave front in the aspect of changes in the group velocity of the wave packet in the cross-section of the vortex and quasi-Bessel beams.

Для случая монохроматической плоской волны фазовая скорость  $v_{ph}$  в среде с показателем преломления  $n$  определяется соотношением  $c/n$ . Несмотря на их математическую простоту, плоские волны несут бесконечную энергию и, следовательно, являются нефизическими. Пучок импульсного излучения, который имеет пространственно-временную локализацию, может быть представлен как суперпозиция плоских монохроматических волн, каждая из которых распространяется с отдельной фазовой скорости. Из-за конструктивной и деструктивной

интерференции между отдельными спектральными компонентами происходит изменение формы импульса по мере формирования и распространения рассматриваемых спиральных и квази-бесселевых пучков. В результате волновой пакет распространяется со скоростью, отличной от фазовой скорости отдельных монохроматических составляющих [1].

Распространение спиральных и квазибесселевых пучков с их экзотическим поведением групповой скорости изучалось в ранее в рядах работ [2-5], однако эти исследования либо не затрагивали ТГц диапазон спектра, либо рассматривалось поведение ТГц излучения только в области сфокусированного пучка. В данной работе мы исследуем свойства вихревых и гаусс-бесселевых структур при распространении в вакууме в двумерном случае для широкоапертурного коллимированного пучка с использованием метода импульсной терагерцевой голографии с разрешением во времени [6], поскольку данный метод основан на измерении полного ТГц волнового фронта с его последующим численным расчетом распространения, что позволяет получать двумерное распределение амплитудных и фазовых характеристик поля для каждой спектральной компоненты. Также метод обеспечивает прямое измерение фазовой скорости волны и групповой скорости волнового пакета, путем анализа распределения электрического поля с применением формализма комплексной огибающей [7]. В частности, мы обсуждаем сверхсветовые эффекты, возникающие в связи с характером распространения волнового фронта данных структур.

#### *Список литературы*

1. Born M., Wolf E., Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light. Cambridge University, 1999, Chap. 1.
2. Budko N.V. // Phys. Rev. Lett. 2009. V.102. 020401.
3. Giovannini D., Romero J., Potoček V., Ferenczi G., Speirits F., Barnett S.M., Faccio D., Padgett M.J. // Science. 2015. V.347. P.857.
4. Lloyd J., et al. Characterization of apparent superluminal effects in the focus of an axicon lens using terahertz time-domain spectroscopy. //Optics communications. 2003. V.219. No 1. P.289-294.
5. Bouchard F., et al. Observation of subluminal twisted light in vacuum. //Optica. 2016. V.3. – No 4. P.351-354.
6. Petrov N.V., Kulya M.S., Тсупкин А.Н., Беспалов V.G., Gorodetsky A.A. Application of Terahertz Pulse Time-Domain Holography for Phase Imaging. // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2016. V.6. No 3. P.464-472.
7. Шполянский Ю.А. Огибающая, фаза и частота оптического сигнала со сверхшироким спектром в прозрачной среде. // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2010. Т.138. №.4. С. 631-641.

М.С. БЫЛИНА, П.А. ЧАЙМАРДАНОВ

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

## КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ УСИЛИТЕЛЯ EDFA С НЕСКОЛЬКИМИ ИСТОЧНИКАМИ СИГНАЛОВ И НАКАЧЕК

В работе предложена математическая модель однокаскадного оптического усилителя EDFA для DWDM систем на основе кварцевого волокна, легированного ионами эрбия, использующего несколько источников попутной и встречной накачки. Разработано программное обеспечение для расчета усилителя EDFA.

M.S. BYLINA, P.A. CHAYMARDANOV

*The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications*

## COMPUTER MODEL OF EDFA AMPLIFIER WITH MULTIPLE SIGNALS AND PUMP SOURCES

In this paper presents mathematical model of a single-stage optical amplifier EDFA for DWDM systems based on erbium-doped silica fiber, uses multiple forward and backward pump sources. Software for solving EDFA amplifier has been developed.

В работе предложена математическая модель однокаскадного ОУ EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier), схема которого представлена на рис. 1. Усиливаемый сигнал формируется в начале усилительного участка волоконно-оптической системы передачи мультиплексором DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing).

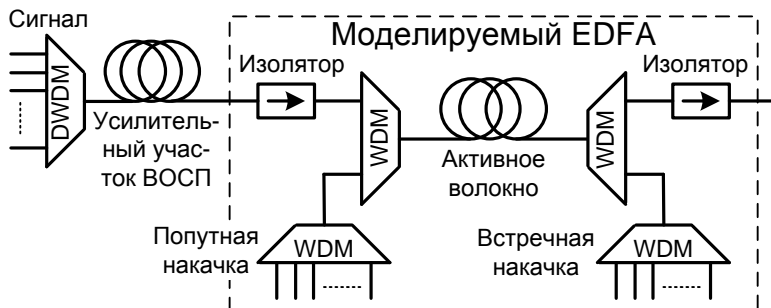


Рис. 1. Схема участка с моделируемым ОУ EDFA

В модели ОУ EDFA процесс усиления в активном оптическом волокне (АОВ) описывается при помощи трехуровневой квантовой системы [1, 2], в соответствии с которой ион эрбия в АОВ в каждый момент времени может находиться на одном из трех энергетических уровней. Уровень 1 с наименьшей энергией является основным, а уровень 2 – метастабильным, то есть среднее время жизни  $\tau$  иона на уровне 2 существенно больше, чем на уровне 3. Расчет ОУ производится в 2 этапа. На первом этапе учитываются усиление и потери в АОВ и решается система уравнений:

$$\begin{aligned} dP_{p1480}^{\pm}/dz &= \mp P_{p1480}^{\pm} [a_{12}(1-N_{2,omn}) - g_{21}N_{2,omn}] \mp \alpha_{pa1480} P_{p1480}^{\pm} \\ dP_{p980}^{\pm}/dz &= \mp P_{p980}^{\pm} [a_{13}(1-N_{2,omn})] \mp \alpha_{pa980} P_{p980}^{\pm} \\ dP_s/dz &= P_s [g_{21}N_{2,omn} - a_{12}(1-N_{2,omn})] - \alpha_{sa} P_s \\ dP_{ASE}^{\pm}/dz &= \pm P_{ASE}^{\pm} [g_{21}N_{2,omn} - a_{12}(1-N_{2,omn})] \pm 2g_{21}N_{2,omn} h\nu_s \Delta\nu \mp \alpha_{sa} P_{ASE}^{\pm} \\ N_{2,omn} &= (W_{12} + R_{12} + R_{13}) / (W_{12} + R_{12} + W_{21} + R_{21} + R_{13} + 1/\tau) \end{aligned}$$

где  $P_s$  – мощность сигнала,  $P_{p1480}^{\pm}$ ,  $P_{p980}^{\pm}$ ,  $P_{ASE}^{\pm}$  – мощности накачек на длинах волн 1480 и 980 нм и шумов усиленного спонтанного излучения (УСИ) в попутном (+) и встречном (–) направлениях  $a_{12}$ ,  $g_{21}$  – коэффициенты поглощения и усиления в полосе сигнала и накачки 1480 нм,  $a_{13}$  – коэффициент поглощения в полосе накачки 980 нм,  $a_{sa}$ ,  $a_{pa1480}$ ,  $a_{pa980}$  – коэффициенты, учитывающие дополнительные потери сигнала и накачек в АОВ, не вызванные поглощением ионами эрбия,  $h$  – постоянная Планка,  $\nu_s$  – частота сигнала,  $\Delta\nu$  – ширина полосы УСИ,  $R_{ij}$  и  $W_{ij}$  – вероятности вынужденных переходов с уровня  $i$  на уровень  $j$ , выражаемые через параметры АОВ и мощности  $P_s$ ,  $P_{p1480}^{\pm}$ ,  $P_{p980}^{\pm}$ ,  $P_{ASE}^{\pm}$ .

На втором этапе учитывается влияние линейных и нелинейных явлений в АОВ и решается нелинейное уравнение Шредингера.

На основе предлагаемой модели разработана программа, позволяющая для любой точки АОВ рассчитывать мощности сигналов в отдельных каналах DWDM, накачек и УСИ, определять коэффициент усиления ОУ и отношение сигнала к шуму в каждом канале. Программа может быть использована разработчиками ОУ EDFA для проверки справедливости принимаемых проектных решений.

#### Список литературы

1. Becker P.C., Olsson N.A., Simpson J.R. Erbium-Doped fiber amplifiers. Fundamentals and Technology. Academic Press, 1997.
2. Desurvire E. Erbium-Doped fiber amplifiers. Principles and applications. New York: John Wiley & Sons, 1994.



А.В. ЦИБУЛЬНИКОВА<sup>1,2</sup>, В.В. БРЮХАНОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград*

<sup>2</sup>*Калининградский государственный технический университет*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЛАЗМОННОГО УСИЛЕНИЯ В КЛАСТЕРЕ ИЗ ДВУХ СЕРЕБРЯНЫХ НАНОЧАСТИЦ**

В работе проведено моделирование коэффициентов плазмонного усиления в кластере, состоящем из двух серебряных наночастиц (НЧ), в зависимости от расстояния между частицами. Максимальный коэффициент усиления соответствует кластерам с радиусом наночастиц  $r=30$  нм и расстоянию между ними  $d=10$  нм.

A.V. TCIBULNIKOVA<sup>1,2</sup>, V.V. BRYUKHANOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Immanuel Kant Baltic Federal State University, Kaliningrad*

<sup>2</sup>*Kaliningrad State Technical University*

## **THE MODELING OF PLASMONS ENHANCEMENT COEFFICIENTS OF TWO SILVER NANOSPHERES CLUSTER**

The modelling of plasmons enhancement coefficients for silver nanoparticles cluster in dependence from distance between nanoparticles was carried out in this work. The most coefficient enhancement corresponds to nanoparticles with radius  $r=30$  nm at distance  $d=10$  nm between silver nanoparticles.

Высокая локализация плазмонных полей на металлических наноструктурах (наночастицах различных форм и размеров, кластерах, нанопористых поверхностях) в виде локального поверхностного плазмонного резонанса притягивает пристальное внимание исследователей и практиков в связи с возможностью его использования в нанофотонике, в фотовольтаических преобразователях, оптоэлектронных приборах и оптических сенсорах, при создании дипольных нанолазеров с наноантенной [1, 2]. Поэтому представляло интерес провести моделирование коэффициентов плазмонного усиления в кластере из двух серебряных наночастиц с учетом вариации радиуса наночастиц и расстояния между ними.

Максимальная величина усиления  $G = 21,40$  составляет для НЧ радиуса 12 нм с зазором между частицами 5 нм. Увеличение зазора до 10

нм дало значение фактора плазмонного усиления  $G=187$  при радиусе НЧ  $r=30$  нм. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1. Коэффициенты плазмонного усиления ( $G$ ) в зависимости от радиуса наночастиц ( $r$ ) и расстояния между наночастицами ( $\Delta$ )

$r$ , нм	$\Delta$ , нм	$G$	$\Delta$ , нм	$G$	$\Delta$ , нм	$G$
30	3	7,54	2	8,06	1	9,78
25	3	7,45	2	7,78	1	9,23
19	3	7,54	2	7,51	1	8,54
15	3	7,95	2	7,45	1	8,06
12	3	8,86	2	7,60	1	7,73
8	3	15,22	2	8,86	1	7,44

Далее представляло интерес определить величину сечения поглощения и сечения рассеяния серебряных НЧ различного радиуса согласно [3]. Результаты вычислений приведены в табл. 2, из которой видно, что независимо от радиуса НЧ сечение рассеяния значительно превышает величину сечения поглощения.

Таблица 2. Сечения поглощения и рассеяния наночастиц различных радиусов

$r$ , нм	19	25	30	60
$\sigma_{\text{abs}}$ , $\text{см}^2$	$1,56 \cdot 10^{-11}$	$3,56 \cdot 10^{-11}$	$6,17 \cdot 10^{-11}$	$50 \cdot 10^{-11}$
$\sigma_{\text{sca}}$ , $\text{см}^2$	$8,5 \cdot 10^{-12}$	$4,4 \cdot 10^{-11}$	$3,4 \cdot 10^{-10}$	$8,36 \cdot 10^{-9}$

#### Список литературы

1. Леонов Н.Б., Прижельский С.Г. Спектральные проявления плазменных колебаний, квазирезонансных собственным частотам индивидуальных наночастиц в островковой пленке серебра. // Оптика и спектроскопия. 2010. Т.108. С.56-63.
2. Болдов И.А., Кучьянов А.С., Плеханов А.И. и др. Оптоволоконный химический сенсор на соединении аминного типа. // Физика твердого тела. 2011. Т.53. №6. С.1088-1090.
3. Климов В.В. Наноплазмоника. М.: Физматлит, 2009.

А.В. ГЛАДЫШЕВ, А.Ф. КОСОЛАПОВ, А.Н. КОЛЯДИН,  
А.Д. ПРЯМИКОВ, А.С. БИРЮКОВ,  
Ю.П. ЯЦЕНКО, И.А. БУФЕТОВ  
*Научный центр волоконной оптики РАН, Москва*

**РАМАНОВСКАЯ ГЕНЕРАЦИЯ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 1,9 мкм  
В ЗАПОЛНЕННОМ ВОДОРОДОМ РЕВОЛЬВЕРНОМ  
СВЕТОВОДЕ С ДВОЙНЫМИ КАПИЛЛЯРАМИ**

Продемонстрирована Рамановская генерация на длине волны 1,9 мкм в заполненных водородом полых световодах, оболочка которых образована одним рядом двойных вложенных капилляров. Порог генерации составил 270 Вт, что в 7 раз ниже ранее полученных значений. Квантовая эффективность преобразования составила 40 %.

A.V. GLADYSHEV, A.F. KOSOLAPOV, A.N. KOLYADIN,  
A.D. PRYAMIKOV, A.S. BIRIUKOV,  
Yu.P. YATSENKO, I.A. BUFETOV  
*Fiber Optics Research Center of the RAS, Moscow*

**RAMAN GENERATION AT 1.9 $\mu$ m IN HYDROGEN-FILLED  
HOLLOW-CORE REVOLVER FIBERS  
WITH NESTED CAPILLARIES**

Raman generation at 1.9  $\mu$ m is demonstrated in hydrogen-filled hollow-core revolver fibers with cladding formed by double nested capillaries. Raman threshold as low as 270 W is achieved, which is 7 times less compared to previously reported results. Quantum efficiency of 40 % is demonstrated.

Заполнение сердцевины полых световодов различными газами открывает путь к созданию газовых волоконных лазеров. Молекулярный водород как активная среда таких лазеров представляет большой интерес, поскольку позволяет осуществлять Рамановское преобразование с большим стоксовым сдвигом 4155 см<sup>-1</sup>. Например, эффективная Рамановская генерация на длине волны 1,9 мкм при накачке на длине волны 1,064 мкм была недавно продемонстрирована в полых световодах револьверного типа, заполненных водородом [1]. Порог генерации в режиме высокого давления (30 атм) в световоде длиной 2 м наблюдался при пиковой мощности накачки 2 кВт.

В данной работе для создания Рамановского волоконного лазера на молекулярном водороде использованы полые кварцевые световоды, оболочка которых состоит из одного ряда двойных вложенных капилляров [2]. Благодаря специальной конструкции световодов удалось уменьшить диаметр полый сердцевинны до 25 мкм (рис. 1б), обеспечив при этом малые оптические потери  $\alpha$  как на длине волны накачки  $\lambda = 1,064$  мкм ( $\alpha = 0,625$  дБ/м), так и на стоксовой длине волны  $\lambda = 1,9$  мкм ( $\alpha = 0,17$  дБ/м). В результате порог генерации был снижен с 2 кВт до 350 Вт при длине световодов 2 м. Увеличение длины световода до 9,6 м позволило снизить порог до 270 Вт, что в 7 раз ниже ранее полученных значений [1]. Квантовая эффективность преобразования составила 46 % (рис. 2а) и 40 % (рис. 2б) для световодов, поперечное сечение которых показано на рис. 1а и рис. 1б, соответственно. Таким образом, показана перспективность полых револьверных световодов с двойными вложенными капиллярами для создания эффективных низкопороговых Рамановских лазеров в ближнем и среднем ИК диапазоне.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 15-02-08840-А и № 15-02-99688-А.

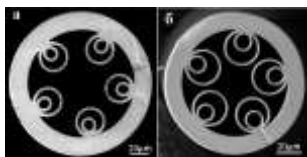


Рис. 1. Поперечные сечения револьверных световодов с оболочкой, состоящей из двойных вложенных капилляров. Диаметр полый сердцевинны 47мкм (а) и 25мкм (б)

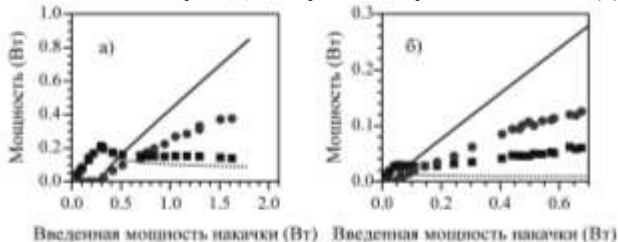


Рис. 2. Измеренная зависимость средней выходной мощности накачки (квадраты) и стоксовой волны (точки) от введенной мощности для световода с диаметром сердцевинны 47 мкм (а) и 25 мкм (б), линии – теоретические зависимости. 300 мВт средней мощности накачки соответствуют 2 кВт пиковой мощности

#### Список литературы

- Gladyshev A.V., et al. // Quantum Electronics. 2015. V.45 (9). P.807–812.
- Kosolapov A.F., et al. // Quantum Electronics. 2016. V.46 (3). P.267-270.

Ф.А. ЕГОРОВ, В.Т. ПОТАПОВ

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

## **ДИНАМИКА ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ НА ОСНОВЕ АКТИВНЫХ МИКРО-(НАНО) СВЕТОВОДОВ С МОДУЛИРУЕМЫМ СПОНТАННЫМ ВРЕМЕНЕМ ЖИЗНИ**

Показано, что в волоконных лазерах с активным микро-(нано) световодом, граничащим с отражающей металлической упругой пластиной, пассивная модуляция спонтанного времени жизни за счет лазерного возбуждения собственных изгибных колебаний пластинки приводит к повышению стабильности частоты автоколебаний, обусловленных оптомеханическим взаимодействием в волоконных лазерах.

F.A. EGOROV, V.T. POTAPOV

*Fryazino branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS*

## **DYNAMICS OF FIBER LASERS BASED ON ACTIVE MICRO-(NANO) FIBERS WITH SPONTANEOUS LIFETIME MODULATION**

It is shown that frequency stability of self-oscillations induced by optomechanical interaction in active micro-(nano) fiber lasers can be improved by passive modulation of spontaneous lifetime due to laser excitation of resonance flexural modes in the thin metal film adjoin the active micro-(nano) fiber.

В активных микро-(нано) световодах (АМС) с поперечными размерами  $d \approx \lambda$  спонтанное время жизни ( $\tau_{sp}$ ) зависит от условий отражения света на границах АМС, что обусловлено зависимостью плотности состояний фотонов от граничных условий [1]. В частности, в АМС, граничащем с металлическим зеркалом, спонтанное время жизни является функцией зазора ( $h$ ) между зеркалом и АМС,  $\tau_{sp} = \tau_{sp}(h)$ , что открывает возможности для реализации новых режимов генерации волоконных лазеров (ВЛ) – в условиях модуляции спонтанного времени жизни в АМС.

В настоящей работе исследована динамика ВЛ на основе АМС, в котором переменные граничные условия реализованы с помощью колеблющейся отражающей металлической пластины (М), граничащей (с некоторым зазором  $h(t) = h_0 + U(t)$ ) с АМС, ( $h_0$  – исх. зазор) (рис. 1).

В условиях непрерывной накачки ( $P_p = const$ ) динамика ВЛ описывается системой уравнений:

$$\dot{\Phi} = B \cdot N \cdot \Phi - \frac{\Phi}{\tau_{ph}(U)} \quad (1)$$

$$\dot{N} = P_p - B \cdot N \cdot \Phi - \frac{N}{\tau_{sp}(U)} \quad (2)$$

$$\ddot{U} + \frac{\omega_m}{Q_m} \cdot \dot{U} + \omega_m^2 \cdot U = \frac{1}{m} \cdot F_\phi = k^* \cdot \Phi, \quad (3)$$

где  $N(t)$ ,  $\Phi(t)$  – инверсия и концентрация фотонов в резонаторе,  $P_p$  – скорость накачки;  $U(t)$  – поперечное смещение (колебания) «центра масс» пластины;  $F_\phi$  – сила оптомеханического взаимодействия (ОВ), обусловленная лазерным излучением. При совпадении частоты релаксационных колебаний в ВЛ ( $\omega_{rel}$ ) с собственной частотой изгибных колебаний пластины  $\omega_m \approx \omega_{rel}$ , в лазерной системе имеют место синхронные автоколебания, обусловленные ОВ и одновременной модуляцией как времени жизни фотона (добротности) в лазерном резонаторе, так и спонтанного времени жизни. Частота автоколебаний ( $\omega$ ) определяется уравнением:

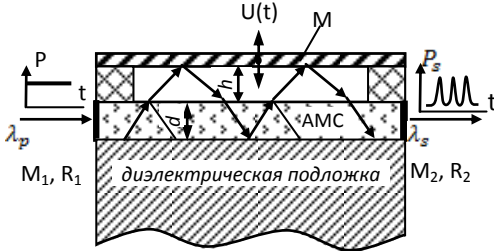


Рис. 1. Схема ВЛ с неподвижной АМС с переменными граничными условиями: М – металлический отражатель (тонкая, гибкая пластина);  $M_{1,2}$  – зеркала резонатора ВЛ

$$(\omega^2 - \omega_m^2) \cdot (\omega^2 - \omega_{rel}^2) - \frac{\omega_{rel}^2 \cdot k^*}{B \cdot \tau_{sp}(U_0)} \cdot (k_p \cdot \xi + k_s) - \frac{\omega_m}{Q_m} \cdot \frac{\omega_{rel}}{Q_{rel}} \cdot \omega^2 = 0 \quad (4)$$

где  $k_s = \frac{1}{\tau_{sp}} \cdot \frac{d\tau_{sp}}{dh}$ ;  $k_p = \frac{1}{\tau_{ph}} \cdot \frac{d\tau_{ph}}{dh}$ ;  $\xi$  – параметр накачки.

Анализ системы уравнений (1-4) показывает, что эффект модуляции спонтанного времени жизни приводит к изменению порога возбуждения и параметров автоколебаний, а также к возможности повышения стабильности частоты автоколебаний за счет оптимизации коэффициентов ( $k_s, k_p$ ), которые при условии  $k_s + \xi \cdot k_p = 0$  приводят к устранению одного из существенных факторов нестабильности частоты автоколебаний – связи осцилляторов.

Список литературы

1. Bao J., Yu N., Capasso F. // Appl. Phys. Lett. 2007. V.91, P.131103.

П.А. НОСОВ, Г.Н. МАРТЫНОВ<sup>1</sup>

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

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

## **АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ, ФОРМИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЕ МОЩНЫХ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ**

Приведены результаты экспериментальных исследований нагрева оптических элементов при формировании излучения мощного волоконного лазера. Разработан метод моделирования распространения через оптическую систему пучка мощного волоконного лазера. Приведены результаты анализа термоаббераций нескольких оптических систем при формировании пучка мощного волоконного лазера.

P.A. NOSOV, G.N. MARTYNOV<sup>1</sup>

*Bauman Moscow State Technical University*

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

## **ANALYSIS OF POWER OPTICS FOR HIGH POWER FIBER LASER PROCESSING HEADS**

Experimental results of optical elements heating due to the laser radiation absorption are presented. A method of modeling high power laser beam propagation through optical system taking into account the heating caused by radiation absorption is proposed. The results of thermo-optical analysis of several laser beam shaping optical systems are presented.

Лазерная обработка материалов реализуется на специальном технологическом оборудовании, основными элементами которого являются источник излучения, система транспортировки излучения и формирующая оптическая система. В настоящее время лидирующую позицию на рынке технологического оборудования занимают установки на базе волоконных лазеров, для которых характерны высокие мощность и качество излучения, что позволяет проводить производительную и точную обработку [1, 2]. При этом применение излучения высокой мощности влечет за собой поглощение и переход энергии лазерного излучения в тепло в элементах оптической системы. Последующие за нагревом процессы, такие как тепловые деформации и изменение показателя преломления материалов оптических элементов, приводят к возникновению тепловой линзы – изменению оптической силы оптической системы, отклонению ее режима работы от расчетного и

нарушению заданных пространственных параметров пучка в зоне обработки. Таким образом, при разработке формирующих оптических систем для современных задач технологической обработки требуется не только сохранять высокое качество пучка, но и учитывать возможные тепловые искажения пучка в рабочей зоне [3-5].

В работе представлены экспериментальные результаты нагрева оптических элементов из кварцевого стекла КС-4В при воздействии излучения непрерывного волоконного лазера различной плотности мощности. Для защитного стекла без просветляющего покрытия при плотности мощности излучения  $0,64 \text{ кВт/см}^2$  максимальный нагрев зарегистрирован в центре защитного стекла. При такой плотности мощности излучения изменение температуры защитного стекла составило всего несколько градусов. В то же время, для защитного стекла с лучестойким просветляющим покрытием при плотности мощности излучения  $10,6 \text{ кВт/см}^2$  защитное стекло нагрелось на  $27,8 \text{ }^\circ\text{C}$ .

В работе также рассмотрены вопросы разработки высококачественных формирующих лазерных оптических систем с учетом термооптических эффектов. Для этого предложен модифицированный метод лучевых пакетов, позволяющий проводить анализ оптических систем, фокусирующих высокомогущное лазерное излучение, оценивать величину нагрева оптических элементов, деформации оптических элементов, а также пространственные параметры пучка на выходе оптической системы. На основе теории абберационного синтеза лазерных оптических систем [5] рассчитан ряд систем. Абберационный анализ этих систем показал, что имеются системы, формирующие пучок мощного волоконного лазера с меньшими искажениями по сравнению с другими оптическими системами. Термооптический анализ выбранной оптической системы показал, что при мощности излучения непрерывного волоконного лазера  $4 \text{ кВт}$  дефокусировка выходной перетяжки меньше конфокального параметра пучка.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-08-00936 а.

#### *Список литературы*

1. Mahrle A., Beyer E. // Journal of Physics D: Applied Physics. 2009. V.42, No17.
2. Powell J., Kaplan A.F.H. // ICALEO 2012 - 31st International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics. 2012. P.277-281.
3. Penano et al // J. Opt. Soc. Am. B. 2009. V.26 (3).
4. Smith W.J. Modern Optical Engineering. 3rd edition. McGraw Hill, 2000.
5. Ширанков А.Ф., Носов П.А. и др. // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2014. №5. С.37-48.



С.С. ВЕРГЕЛЕС<sup>1,2</sup>, Л.Л. ОГОРОДНИКОВ<sup>2,3</sup>, В.В. ЛЕБЕДЕВ<sup>1,2</sup>,  
И.В. КОЛОКОЛОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, Черноголовка*

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

<sup>3</sup>*Сколковский институт науки и технологий, Московская обл.*

## **ОТЛИЧИЕ СТАТИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ СЛУЧАЙНОГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА ОТ ГАУССОВОЙ**

Получены выражения для корреляционного момента четвертого порядка напряженности поля в первом и втором порядках по параметру нелинейности, найденные с помощью диаграммной техники Уайльда. Найдена параметрическая зависимость корреляторов от параметров задачи.

S.S. VERGELES<sup>1,2</sup>, L.L. OGORODNIKOV<sup>2,3</sup>, V.V. LEBEDEV<sup>1,2</sup>,  
I.V. KOLOKOLOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Landau Institute for Theoretical Physics of the RAS, Chernogolovka*

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

<sup>3</sup>*Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow region*

## **THE DIFFERENCE OF RANDOM FIBER LASER STATISTICS FROM GAUSSIAN ONE**

The terms for forth order's correlation moment of field's tention, found by Wyld's diagram technique in the first and second order of nonlinear parameter, are obtained. The dependences on the parameters of correlators are also found.

В последнее время большой интерес вызывают исследования в активно развивающейся области физики, связанной со случайными волоконными лазерами. Их создание и развитие имеют большое значение для различных телекоммуникационных средств связи и распределенных сенсорных систем [1].

В [5] построена волновая кинетическая теория для активных циклических слабонелинейных волновых систем, которая может быть использована для описания работы случайного волоконного лазера. В частности, были установлены спектры излучения при разных мощностях порога генерации, зависимость интенсивности излучения от частоты и зависимость ширины спектра от выходной мощности, которые хорошо описывают имеющиеся экспериментальные результаты [5].

Одним из неисследованных вопросов, связанных со случайным волоконным лазером, является статистика излучения данного лазера. В [5] было использовано предположение о том, что функция распределения напряженности выходного излучения имеет гауссов вид. Однако, в силу нелинейности процессов, а именно, квадратичной зависимости показателя преломления от напряженности электрического поля (эффект Керра), имеющих место в механизме формирования излучения в данном лазере, функция распределения напряженности может иметь отличие от гауссова вида. Значимость этого отличия можно определить путем использования теоремы Вика.

Целью данной работы является определение отличия статистики излучения данного лазера от гауссовой. Поставленная задача решается путем вычисления корреляционного момента четвертого порядка  $I^{(4)}$  напряженности поля  $\psi$  ( $I^{(4)} = |\psi|^4$ ) и сравнения его с квадратом интенсивности выходного излучения  $I$  ( $I = |\psi|^2$ ). Решение поставленной задачи позволит оценить статистику излучения лазера, что может иметь большое значение для различных практических применений.

В данной работе производится вычисление коррелятора четвертого порядка с использованием диаграммной техники Уайльда в первом и во втором порядке по теории возмущений по малому параметру нелинейности. В первом и втором порядках по параметру нелинейности отличие коррелятора от гауссова значения оказывается малым по параметру нелинейности, но конечным даже в пределе нулевого усиления.

#### *Список литературы*

1. Turitsyn S.K. et. all. Random distributed feedback lasers. // Physics Reports, 2014.
2. Звелто О. Принципы лазеров, 4-е изд. СПб.: Издательство «Лань», 2008.
3. Turitsyn S.K., et. all. Random distributed feedback fibre lasers // Nature Photonics, 2010.
4. Wiersma D.S. The physics and applications of random lasers // Nature Physics. 2008. 4. P.359-367.
5. Churkin D.V., et all. Wave kinetics of random fibre lasers // Nature Communications. 2015. 2.

В.П. ДУРАЕВ, С.В. МЕДВЕДЕВ  
*ЗАО «Нолатех», Москва*

## **ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ ОДНОЧАСТОТНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ**

Представлены результаты работ по созданию одночастотных перестраиваемых по длине волны полупроводниковых лазеров с внешним резонатором на основе волоконных брэгговских решеток, сформированных в одномодовом волоконном световоде. Рассмотрены способы плавной перестройки длины волны излучения.

V.P. DURAEV, S.V. MEDVEDEV  
*JSC "Nolatech", Moscow*

## **TUNABLE SINGLE-FREQUENCY SEMICONDUCTOR LASERS AND ITS APPLICATION**

The results of works on creation of single-frequency tunable wavelength semiconductor laser with an external cavity based on fiber Bragg gratings formed in a single-mode optical fiber are presented. The methods of the smooth wavelength adjustment are considered.

Представленные лазеры способны генерировать стабильное излучение с узкой шириной линии (менее 100 кГц) в диапазоне 635-1650 нм. Для многих практических применений лазеров важная задача – получение одночастотного режима генерации [1]. Еще одна важная особенность лазеров, которая дополнительно расширяет круг их применений, состоит в возможности широкой перестройки длины волны.

Для многих практических применений требуются значительно большие мощности излучения и стабильная узкая ширина линии излучения. Чаще всего, в этих случаях, применяются лазеры с внешним резонатором, в качестве которого используется дифракционная решетка. Основными элементами конструкции являются: двухпроходный оптический усилитель с отражающим покрытием на задней грани резонатора 90% и просветляющим покрытием на передней грани 0,01% и брэгговская решетка, сформированная в одномодовом световоде [2]. Коэффициент отражения решетки обычно составляет 10-20%, селективность 0,1...10 нм. Для лучшего согласования лазерного кристалла с волоконным световодом на конце последнего формируется цилиндрическая микролинза, увеличивающая эффективность стыковки до

80%. Для уменьшения обратных отражений на микролинзу наносится просветляющее покрытие.

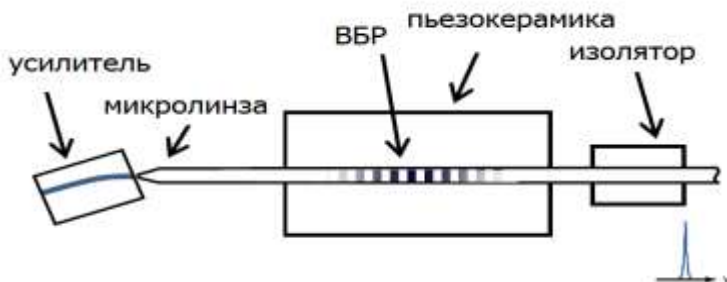


Рис. 1. Конструкция лазера с ВБР и с двухпроходным усилителем

Плавная перестройка длины волны может быть осуществлена в пределах спектра отражения решетки за счет изменения тока инжекции или температуры ЛД [3]. Величина перестройки зависит от контура отражения решетки (0,15 - 0,2 нм). Такой способ перестройки не является стабильным.

Более стабильная перестройка в более широком диапазоне возможна за счет изменения показателя преломления волокна в области решетки. Волокно с решеткой помещается на пьезокерамику, способную изменять линейные размеры.

Получены следующие результаты для плавной перестройки: диапазон перестройки - 1,3 нм; шаг перестройки - менее 0,01 нм; мощность излучения - 10 мВт; ширина линии генерации - <100кГц.

Таким образом, плавная перестройка длины волны возможна за счет изменения сжатия/растяжения решетки, что очень востребовано при применении этих лазеров в спектроскопии высокого разрешения, в волоконно-оптических линиях связи со спектральным уплотнением каналов, в интерферометрии и т. д.

#### Список литературы

1. Дураев В.П., Неделин Е.Т. Полупроводниковые лазеры с волоконно брэгговской решеткой и узким спектром генерации на длинах волн 1530-1560 нм. // Квантовая электроника. 2001. Т.31. №6.
2. Медведков О.И., Королев И.Г., Васильев С.А. Запись волоконных брэгговских решеток в схеме с интерферометром Ллойда и моделирование их спектральных свойств. Препринт НЦВО ИОФ РАН. 2004. №6.
3. Дураев В.П., Медведев С.В. // Фотоника. 2015. №6,(45). С.54.

С.М. ТОМИЛОВ, М.К. ТАРАБРИН,  
В.А. ЛАЗАРЕВ, Д.А. ШЕЛЕСТОВ

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

## **СИСТЕМА ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ АКТИВНОЙ СРЕДЫ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ЛАЗЕРА СРЕДНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА**

Спроектирована и собрана система стабилизации температуры активной среды твердотельного лазера на халькогенидах с водяным охлаждением. Проанализированы два варианта конструкции теплоотвода, в том числе с использованием графитовой термопленки. Показано, что система термостабилизации позволяет поддерживать температуру активной среды лазера в диапазоне от  $-4^{\circ}\text{C}$  до  $+20^{\circ}\text{C}$  с точностью не хуже  $0.5^{\circ}\text{C}$ .

S.M. TOMILOV, M.K. TARABRIN,  
V.A. LAZAREV, D.A. SHELESTOV  
*Bauman Moscow State Technical University*

## **THERMOSTABILIZATION SYSTEM FOR MID-INFRARED SOLID STATE LASER ACTIVE MEDIA**

Thermostabilization system for solid state laser active media was designed. Two schemes were analyzed including pyrolytic graphite sheet (PGS) based. System capability to keep active media temperature with precision of  $0.5^{\circ}\text{C}$  in a range from  $-4^{\circ}\text{C}$  to  $+20^{\circ}\text{C}$  was shown.

Данная работа посвящена оптимизации системы охлаждения двухзеркального  $\text{Cr}^{+2}:\text{CdSe}$  лазера [1]. Для повышения выходной мощности и снижения порога накачки нужно увеличить время жизни электронов на верхних уровнях атомов активной среды. Время жизни растет с понижением температуры.

Для отвода лишней тепловой энергии от активных сред твердотельных лазеров традиционно применяется водяное охлаждение, однако данный метод обладает несколькими существенными недостатками - невозможность достижения температур ниже, чем точка замерзания воды, что определяет нижнюю границу допустимого диапазона, и низкая стабильность температуры кристалла.

Для устранения недостатков разработана система охлаждения, принцип действия которой состоит в применении элементов Пельтье (ЭП)

для создания разницы температур относительно температуры воды и прецизионной отработки температурных нестабильностей системы. Стабилизация температуры осуществляется за счёт контура обратной связи [2], включающей в себя термодатчики, контроллер, усилитель мощности и ЭП (способен пропускать до 30 Вт тепловой мощности). Опытный образец контроллера ЭП способен поддерживать заданную температуру с точностью, ограниченной термодатчиком.

Были проанализированы 2 схемы термостабилизации. Первоначально использовалась схема простого водяного охлаждения (рис. 1а), состоящая из металлического радиатора, в котором закреплен кристалл.

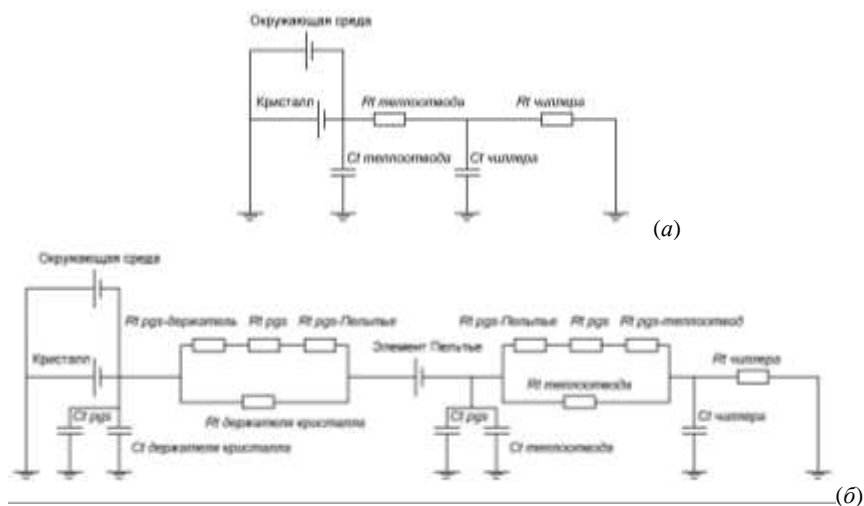


Рис. 1. Тепловые схемы системы водяного охлаждения

Модернизированная схема (рис. 1б) представляет собой две металлические пластины, одна из которой охлаждается чиллером, а на второй закреплён кристалл. Теплообмен между ними через ЭП. В качестве термоинтерфейса между ЭП и металлическими пластинами были применены пиролитические графитовые листы (PGS), обладающие показателем теплопроводности, во много раз большим, чем у металлов. Обладая низким термосопротивлением, графитовые листы шунтируют термосопротивление пластин и повышают эффективность теплоотвода.

#### Список литературы

1. Lazarev V.A., et al. // Laser Phys. Lett. 2015. V.12. P.125003.
2. Шелестов Д.А., Томилов С.М. // Фотоника 2016. V.4. P.52-63.

К.И. КОЗЛОВСКИЙ, М.И. ЛИСОВСКИЙ, А.А. ПЛЕХАНОВ,  
А.А. ЧИСТЯКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **ОСОБЕННОСТИ ШИРОКОПОЛОСНОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МАЛОИНДУКТИВНОГО РАЗРЯДА С ЛАЗЕРНЫМ ИНИЦИИРОВАНИЕМ**

Сообщается о результатах измерения интенсивности и спектра терагерцового (ТГц) излучения мало индуктивного электрического разряда с энергозапасом ~ 50 Дж между анодом и катодом в вакууме, инициируемого воздействием лазерного излучения на один из электродов.

K.I. KOZLOVSKY, M.I. LISOVSKY, A.A. PLEKHANOV,  
A.A. CHISTYAKOV

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

## **FEATURES OF BROADBAND THz LOW-INDUCTANCE DISCHARGE WITH LASER INITIATION**

Is reported on the results of measurements of the intensity and spectrum of THz radiation low inductive electrical discharge with energy store ~ 50 J between the anode and the cathode in a vacuum, initiated by exposure to laser radiation on one of the electrodes.

Излучение лазера (0,05 – 0,80 Дж, 10 нс) фокусировалось на электроде в пятно площадью 0,1 – 0,5 мм<sup>2</sup>. Напряжение между электродами составляло 6-15 кВ. Зазор между стальными электродами, конусом и отверстием диаметром 5 мм, составляло также 5 мм.

Наблюдалось достаточно стабильное пинчевание лазерной плазмы, менее стабильно регистрировалось ТГц излучение мощностью до 200 Вт в импульсе длительностью ~ 50 нс. На основе рассмотрения спектрального состава ТГц излучения обсуждаются механизмы его генерации [1, 2].

Схематическое изображение экспериментальной установки представлено на рис. 1. На рис. 2 показана осциллограмма импульсов фотоэмulsionной камеры (ФЭК) и тока, на графике тока можно увидеть провалы на фронте и у максимума сигнала, эти провалы свидетельствуют о пинчевании плазмы. Рис. 3 изображает осциллограмму сигнала с пироэлектрического детектора, установленного в фокусе ТГц линзы, расположенной напротив окна камеры.

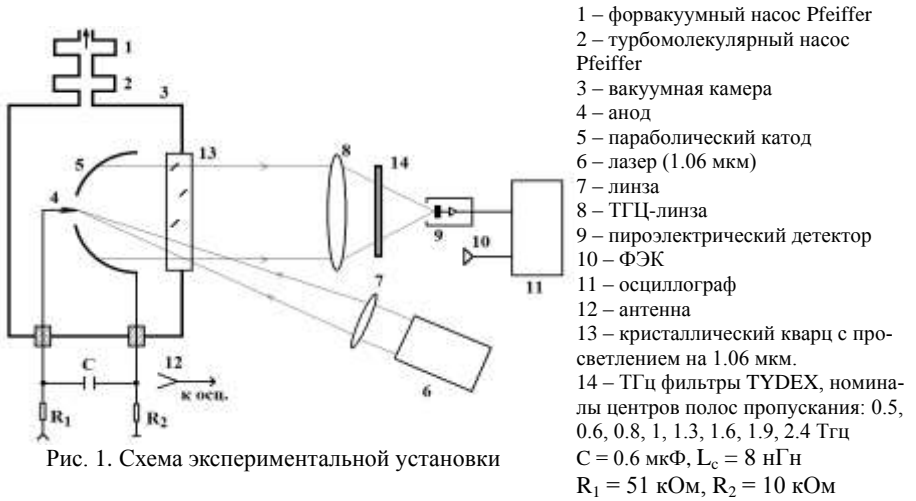


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

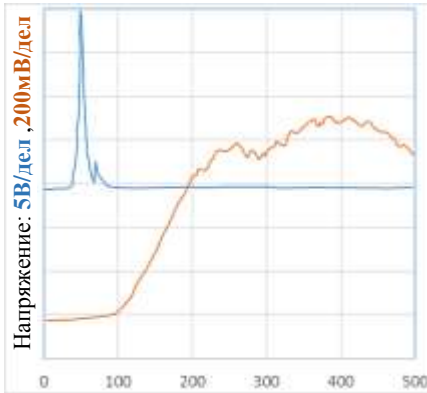


Рис. 2. Импульсы ФЭК и тока

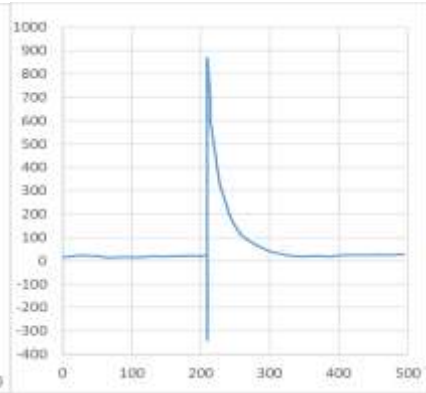


Рис. 3. Импульс ТГц излучения на пьезоэлектрическом датчике.  
 Горизонтальная шкала: 100 нс/дел,  
 вертикальная шкала: 100 мВ/дел

*Список литературы*

1. Lee T.N.// Astrophys. J. 1974. V.190. P.467.  
 2. Turechek J.J. // Preprint №212P008. USA, 1972.



Ю.В. СОРОКИН

*Национальный центр лазерных систем и комплексов «Астрофизика», Москва*

## **СУММАТОР НА ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ**

Фотонные кристаллы (ФК) представляют собой новый тип искусственных структурно-организованных сред с трехмерной периодичностью оптических характеристик, в которых элементарные кристаллические ячейки имеют размеры порядка оптической длины волны. Разработан оптический сумматор на фотонных кристаллах.

Yu. V. SOROKIN

*National Center of Laser Systems and Complexes Astrophysika, Moscow*

## **ADDER ON PHOTONIC CRYSTALS**

Photonic crystals (PC) is a new type of artificial structurally organized environments with three-dimensional periodicity of the optical characteristics, in which the elementary cells of the crystal have dimensions of the order of optical wavelength. Developed optical combiner photonic crystals.

Стандартные световедущие каналы на основе оптического волокна не могут иметь крутых изгибов из-за недопустимого увеличения потерь, вызванного нарушением полного внутреннего отражения в них. Световедущие каналы в фотонном кристалле основаны на другом принципе: практически идеальное отражение света под любым углом от стенок световедущего канала обеспечивается наличием “запрещённой зоны” для световой волны передаваемой частоты, препятствующей проникновению света внутрь фотонного кристалла. Частота запрещенной зоны определяется по формуле:

$$W_0 = \pi c / r \langle n \rangle$$

где:  $r$  - расстояние между неоднородностями,  $c$  – скорость света,  $W$  – частота запрещенной зоны,  $\langle n \rangle$  - средний коэф. преломления.

Структура мощного волоконного лазера представляет собой модуль состоящий из задающего генератора и волоконного усилителя, после которого излучение поступает на сумматор. Излучение с одного модуля имеет одномодовый характер, а после сумматора становится многомодовым и теряет свои пространственные свойства. Мощные

установки в 100 кВт и более становятся многомодовыми и нуждаются в дополнительных формирующих устройствах.

Введение фотоннокристаллических элементов приводит к упрощению конструкции сумматора, функционально на оптических осях  $N$  коллимирующих объективов располагаются входы фотонных кристаллов с полый световодной жилой диаметром  $D$ , выходы которых оптически соединены с фотонным кристаллом с полый световодной жилой диаметром  $D(N)^{0/5}$  на оптической оси выхода которого расположена оптическая система. Излучение от группы источников излучения (лазеров), на оптических осях которых расположены коллимирующие объективы, поступает на входы  $N$  фотонных кристаллов с полый световодной жилой диаметром  $D$  и разрешенной зоной соответствующей рабочей длине волны лазера –  $\lambda_w$ , далее излучение от каждого канала поступает на общий вход фотонного кристалла с диаметром полый световодной жилы  $D(N)^{0/5}$ , где происходит суммирование поступающего излучения от  $N$  лазеров и далее оно поступает на формирующую оптическую систему. Конструкция значительно упрощена и увеличена надежность оптического суммирования, а также расширяет возможности суммирования источников с разными длинами волн. Можно проводить мультиплексирование и фильтрацию излучения.

Мощные волоконные лазеры собираются из отдельных модулей мощностью до 1.5 кВт с одномодовым выходом. Сборка модулей использует стандартные разветвители для вывода суммарного излучения, после ряда сумматоров излучение имеет характер многомодового, что влияет на диаграмму направленности выходного излучения. Применение в качестве сумматора элемента на фотонных кристаллах приводит к повышению качества лазерного излучения и формированию узкого канала излучения с высокой плотностью.

В частности характеристики оптической фокусирующей системы зависят от модового состава излучения. Использование фотоннокристаллических структур в волоконных лазерах позволяет создать мощные лазерные системы с высокими выходными характеристиками излучения.

#### *Список литературы*

1. Сорокин Ю.В. и др. Волоконно-оптическая система для эффективной передачи лазерного излучения большой мощности // Сб. трудов международной конференции «Лазерная физика и применение лазеров» LPA-2003, Минск.

Д.А. КОЗЛОВ<sup>1</sup>, В.В. КОТЛЯР<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Институт систем обработки изображений РАН, Самара*

<sup>2</sup>*Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева*

## **ОСТРАЯ ФОКУСИРОВКА ЛАЗЕРНОГО СВЕТА ДВУХСЛОЙНЫМ МИКРОЦИЛИНДРОМ С КРУГЛЫМ СЕЧЕНИЕМ**

В данной работе, на основе аналитического решения задачи дифракции излучения на двухслойном цилиндре с круглым сечением, рассмотрена фокусировка света при возбуждении резонанса в цилиндре из кварцевого стекла и полиэстера. Расчёт показал, что подбором размеров слоёв можно получить минимальное фокусное пятно для нескольких разных цилиндров. В данном случае минимальное фокусное пятно вблизи поверхности цилиндра имело поперечный размер в три раза меньший дифракционного предела и равный  $0,16$  длины волны.

D.A. KOZLOV<sup>1</sup>, V.V. KOTLYAR<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Image Processing Systems Institute of the RAS, Samara*

<sup>2</sup>*Samara National Research University*

## **SHARP LASER LIGHT FOCUSING BY A TWO-LAYER MICROCYLINDER WITH CIRCULAR CROSS-SECTION**

In this paper we present modeling results of light focusing on a two-layered dielectric cylinder with circular cross section under excitation of whispering gallery modes. Results are based on the exact analytical solution to the diffraction problem and demonstrate that minimal transverse dimension of  $0.16$  wavelength can be achieved by adjusting the configuration of layers of cylinder made of polystyrene and quartz glass.

Среди работ по фокусировке лазерного света на препятствиях, сравнимых с длиной волны, можно выделить работы, посвящённые возбуждению резонансов в микрообъектах [1, 2]. Данные резонансы, называемые также модами шепчущей галереи (моды ШГ), позволяют уменьшить размер фокусного пятна.

Минимальный размер пятна, рассчитываемый как поперечный размер области высокой интенсивности по полуспаду от максимального значения, был получен в [3] и составляет  $\text{FWHM}=0,15 \lambda$ .

В данной работе на примере двухслойного цилиндра, состоящего из однородного диэлектрического ядра (стрежня) из кварцевого стекла с  $n=1,4570$  и диэлектрической оболочки из полиэстера с  $n=1,5875$ , показано,

что при определённой конфигурации возможно возбудить моды ШГ таким образом, что фокусные пятна вблизи поверхности цилиндров будут иметь одинаковый минимальный поперечный размер ( $\text{FWHM}=0,16 \lambda$ ), который в почти три раза меньше чем дифракционный предел ( $\text{FWHM}=0,44 \lambda$ ). Результаты получены из аналитического решения задачи дифракции плоской волны с ТЕ-поляризацией на диэлектрическом цилиндре с произвольным числом слоёв.

Так, например, мода с номером 25 (изображена на рис. 1) может быть получена в цилиндре с радиусом оболочки  $R_1=3,0 \lambda$  и радиусом ядра  $R_0=2,6935 \lambda$ . При данной конфигурации в результате облучения плоской волной получено фокусное пятно с поперечными размерами  $\text{FWHM}=(0,16 \pm 0,04)\lambda$ , и продольным размером  $\text{DOF}=(0,02 \pm 0,01) \lambda$ . В [3] настолько маленькие размеры пятна были достигнуты при фокусировке света на однородном цилиндре при возбуждении высокочастотной моды с номером 30, однако представленные результаты показывают, что такую же фокусировку можно получить при возбуждении мод с меньшим номером.

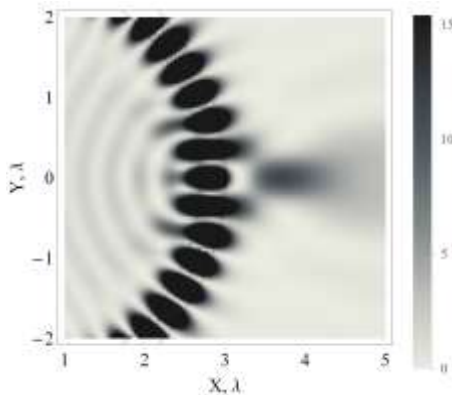


Рис. 1. Двумерное негативное распределение интенсивности на границе двухслойного цилиндра при возбуждении моды ШГ с номером 25

#### Список литературы

1. Geints Y.E., Zemlyanov A.A., Panina E.K., Photonic jets from resonantly excited transparent dielectric microspheres // J. Opt. Soc. Am. B. 2012. V.29(4). P.758-762.
2. Козлова Е.С., Котляр В.В., Дегтярёв С.А. Моделирование резонансной фокусировки пикосекундного импульса диэлектрическим микро-цилиндром // Компьютерная оптика. 2015. Т.39. №1. С.45-51.
3. Котляр В.В., Козлов Д.А., Ковалёв А.А., Расчёт резонансного радиуса диэлектрического цилиндра при освещении его плоской волной ТЕ-поляризованного света // Компьютерная оптика. 2015. Т.39. №2. С.163-171.

**В.В. ВАСИЛЬЦОВ, М.Г. ГАЛУШКИН, В.Я. ПАНЧЕНКО**  
*Институт проблем лазерных и информационных технологий – филиал  
ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Шатура*

## **ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ КАНАЛОВ В БИОТКАНЯХ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИЗЛУЧЕНИЯ CO<sub>2</sub> ЛАЗЕРА**

Проведён анализ временных характеристик механизма образования канала в биотканях, создаваемого излучением мощного волноводного CO<sub>2</sub> лазера. Определены скорости движения фронта испарения и характерные времена углубления парогазового канала. Сделаны оценки влияния расширения пучка излучения на динамику роста глубины канала.

**V.V. VASILTSOV, M.G. GALUSHKIN, V.Ya. PANCHENKO**  
*Institute on Laser and Information Technologies – branch of FSRC  
“Crystallography and Photonics” of the RAS, Shatura*

## **DYNAMIC CHARACTERISTICS OF CHANNEL FORMATION IN BIOTISSUE UNDER CO<sub>2</sub> LASER RADIATION**

Abstract. The analysis of time response characteristics of the mechanism of formation of the channel in the biofabrics, created by radiation powerful waveguide CO<sub>2</sub> laser. Velocities of a motion of front of transpiration and the characteristic times of a dimple *парогазового* the channel are spotted. Estimates of influence of expansion of a bundle of radiation on dynamics of growth of depth of the channel are made.

Лазерная перфорация в биотканях относится к сложным явлениям взаимодействия лазерного излучения с веществом, которые пока ещё до конца не изучены. Общепринятой является роль испарения материала в лазерной перфорации. Однако трудной задачей остаётся теоретическое определение реальных пороговых значений интенсивности, глубины канала и динамики его образования [1].

В данной работе исследуется влияние изменения интенсивности сфокусированного гауссова пучка на динамику роста глубины канала и проводится сравнительный анализ расчётных и экспериментальных зависимостей глубины канала от времени воздействия

Для описания роста глубины канала используется уравнение

$$J_0(h) - J_{th} = \rho L_v V = \rho L_v \frac{dh}{dt}, \quad (1)$$

где  $J_0(h)$  - интенсивность излучения на дне канала глубиной  $h$ ,  $\rho$  - плотность биоткани в жидком состоянии,  $L_v$  - параметр, учитывающий затраты энергии на нагрев до температуры кипения и испарение материала,  $J_{th}$  - пороговая интенсивность излучения, при которой начинается образовываться канал. Для гауссова пучка нетрудно получить решение уравнения (1). Оно зависит от двух параметров  $J_{th}$  и  $\rho L_v$ , причём пороговая интенсивность очень трудно определяется, поскольку зависит от турбулентного движения жидкости в зоне интенсивного нагрева и давления паров в канале [1]. Из-за неполной определённости параметров  $J_{th}$  и  $\rho L_v$  решение уравнения, которое рассматривалось в [2], не очень пригодно для практического использования. Однако в сочетании решения уравнения (1) с экспериментальными зависимостями  $h(t)$  удаётся оценить величины параметров  $J_{th}$  и  $\rho L_v$ . Для этого использовались экспериментально измеренные значения максимальной глубины канала (для нахождения  $J_{th}$ ) и скорость роста канала на начальном участке графика  $h(t)$  (для вычисления  $\rho L_v$ ). Полученные пороговые интенсивности согласуются с результатами работы [1].

#### *Список литературы*

1. Голубев В.С. Канализованное проникновение в воду пучка излучения CO<sub>2</sub> лазера // в кн. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок /под ред. В.Я. Панченко. М: Физматлит, 2009. С.117-156.
2. Артюшенко В.Г., Калайджян К.И., Миракян М.М. // Известия Академии наук СССР, серия Физическая. 1990. Т.54. №10. С.1881-1884.

В.Э. РЕПИН<sup>1,2</sup>, Д.Г. НИКИТИН<sup>1,2</sup>, В.А. ТЫРТЫШНЫЙ<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>НТО «ИРЭ-Полус», Фрязино

## **СРАВНЕНИЕ ПОРОГОВ ЛАЗЕРНОГО РАЗРУШЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПРОСВЕТЛЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ SiO<sub>2</sub>/Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>**

Исследована лучевая стойкость различных просветляющих покрытий SiO<sub>2</sub>/Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> на подложках разного качества. Определены основные параметры покрытий, имеющие негативное влияние на порог лазерного разрушения.

V.E. REPIN<sup>1,2</sup>, D.G. NIKITIN<sup>1,2</sup>, V.A. TYRTYSHNYY<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>IRE-Polus Corporation, Fryazino

## **COMPARISON OF SiO<sub>2</sub>/Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ANTIREFLECTION COATINGS LASER-INDUCED DAMAGE THRESHOLDS**

Laser-induced damage of SiO<sub>2</sub>/Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> antireflection coatings sputtered onto two different types of substrates was investigated. Coating parameters that substantially decrease laser-induced damage threshold intensity level were explored.

Оптические покрытия защищают поверхность от воздействия окружающей среды и позволяют управлять коэффициентом отражения в зависимости от длины волны. Оптическим интерференционным покрытием называют структуру из тонких чередующихся слоев. В качестве веществ с высоким показателем преломления используются оксиды титана, гафния, тантала, циркония и другие, а слои с низким показателем преломления могут быть, например, из оксида кремния.

Просветление наносится на поверхность объективов фото- и видеокамер для увеличения коэффициента пропускания света. Просветляют и оптические элементы лазеров, где достигаются высокие пиковые плотности мощности излучения  $\sim 1$  ГВт/см<sup>2</sup>. При таких значениях интенсивности может происходить локальное оптическое разрушение покрытия. Механизм разрушения зависит от многих параметров, например, длины волны и интенсивности излучения, длительности импульсов [1].

Таким образом, в лазерной оптике возникает потребность в многослойных покрытиях, устойчивых к столь сильному воздействию. Для количественной характеристики критической плотности мощности излучения вводят понятие порога лазерного разрушения, измерение которого регламентируется соответствующими стандартами [2].

В ходе данной работы на подложки из плавленного кварца с различным качеством обработки поверхности нанесены просветляющие покрытия  $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$  отличающиеся количеством и толщиной слоёв (рис. 1). Для полученных образцов определен порог лазерного разрушения.

Экспериментальная установка представлена на рис. 2. Для достижения лазерного разрушения при доступной оптической пиковой мощности 30 кВт выходной пучок с  $M^2 \sim 1,3$  собирается специальной системой линз с малыми aberrациями. Переднее фокусное расстояние 20 мм. Оценённое значение диаметра перетяжки 15 мкм.

Образец на подвижке совершает вдоль оси распространения излучения периодические колебания вблизи области перетяжки. Разрушение происходит в момент прохождения поверхности через область с максимальной интенсивностью и регистрируется камерой с объективом по изменению мощности рассеянного излучения.

Оказалось, что лучевая стойкость покрытий на подложках из кварца с разным качеством обработки поверхности может отличаться в несколько раз. Разница порогов разрушения двуслойных покрытий с различными толщинами слоёв оказалась в пределах погрешности эксперимента, а лучевая стойкость для 12-слояного покрытия в 2 раза ниже, чем для двуслойных.

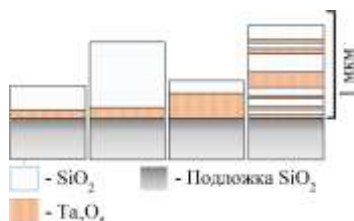


Рис. 1. Конструкции просветляющих покрытий

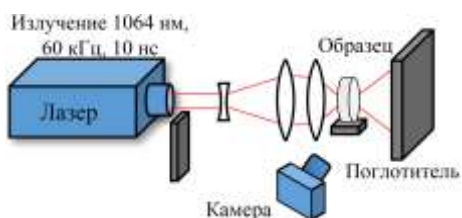


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

#### Список литературы

1. Wood R.M. Laser-Induced Damage of Optical Materials. Taylor & Francis, 2003.
2. ISO 21254-1:2011(E). Lasers and laser-related equipment – Test methods for laser-induced damage threshold. 2011. P.1.



А.А. КОРОННОВ<sup>1</sup>, А.Е. САФУТИН<sup>1</sup>, М.М. ЗЕМЛЯНОВ<sup>1</sup>,  
Г.М. ЗВЕРЕВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>АО «НИИ «ПОЛЮС» им. М.Ф. Стельмаха», Москва

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет),  
Долгопрудный

## СТОЙКОСТЬ ФОТОДИОДОВ К ЗАСВЕТКЕ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

В работе рассмотрена стойкость к лазерному излучению с длиной волны  $\lambda=1.06$  мкм фотодиодов реализованных на базе германиевых, кремниевых и  $A_{III}B_V$  фотодиодных структур для ближнего инфракрасного диапазона. Показана целесообразность применения кремниевых фотодиодов в системах импульсной лазерной дальнометрии, работающих на длине волны  $\lambda=1.06$  мкм.

A.A. KORONNOV<sup>1</sup>, A.E. SAFUTIN<sup>1</sup>, M.M. ZEMLYANOV<sup>1</sup>,  
G.M. ZVEREV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>JSC "POLYUS Research Institute of M.F. Stelmah", Moscow

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

## DURABILITY OF PHOTODIODES TO LASER IRRADIATION

The durability of germanium, silicon and  $A_{III}B_V$  photodiodes to laser irradiation of wavelength  $\lambda=1.06$  um was studied. It was shown that among studied photodiodes the silicon ones showed better durability in the laser range finders of wavelength  $\lambda=1.06$  um.

Одной из распространенных причин выхода из строя импульсного лазерного дальномера является обратная засветка фотоприёмного устройства мощным лазерным излучением, отраженным от близлежащих целей или целей, имеющих высокий коэффициент отражения. В связи с этим особый интерес представляет сопоставление стойкости к воздействию лазерного излучения фотоприёмных устройств, выполненных на базе кремниевых, германиевых и  $A_{III}B_V$  фотодиодов.

Опубликованные в литературе данные относительно стойкости  $A_{III}B_V$  фотодиодов указывают на допустимый диапазон плотности мощности засветки от  $10^5$  до  $5 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> на длине волны  $\lambda = 1.06$  мкм при длительности импульса от 4 до 20 нс [1]. Проведенные в недавнее время исследования германиевых лавинных фотодиодов показывают, что допустимая плотность мощности воздействия на длине волны

$\lambda = 1.06$  мкм достигает значения  $10^8$  Вт/см<sup>2</sup> при длительности импульса 4 нс [1], что свидетельствует о более высокой стойкости германиевых фотодиодов перед  $A_{III}B_V$  фотодиодами для ближнего ИК диапазона. Однако данных относительно стойкости кремниевых фотодиодов к аналогичному воздействию в литературе представлено в недостаточной степени.

В настоящей работе проведено сопоставление стойкости кремниевой и германиевой фотодиодных структур к воздействию лазерного излучения с длиной волны  $\lambda = 1.06$  мкм сфокусированного в пятно диаметром 10 мкм при длительности импульса 4 нс. Было установлено, что визуально различимое разрушение поверхности германиевой структуры наступает при воздействии мощностью в диапазоне от 100 до 135 Вт, в то время как для кремния аналогичное дефектообразование наблюдается в диапазоне мощностей засветки от 135 до 300 Вт. По видимому, такое незначительное отличие в стойкости исследуемых структур объясняется тем, что нагрев кремния при его засветке сопровождается сдвигом края полосы поглощения в длинноволновую область и увеличению коэффициента поглощения в приповерхностном слое материала. Таким образом, при воздействии на кремневый фотодиод лазерного излучения следует ожидать отсутствия нарушений в области удаленного от поверхности  $p$ - $n$  перехода, что было подтверждено экспериментально для фотодиодов подверженных многократной засветке с плотностью мощности на уровне  $10^9$  Вт/см<sup>2</sup>, которая не приводила к изменению темного тока. Настоящие результаты показывают целесообразность применения кремниевых фотодиодов для обеспечения повышенной стойкости фотоприёмных устройств к лазерному излучению с длиной волны  $\lambda = 1.06$  мкм.

#### *Список литературы*

1. Короннов А.А., Сафутин А.Е., Землянов М.М. и др. // Прикладная физика. 2015. №6. С.65- 69.

**М.Я. ЩЕЛЕВ**, О.И. МЕШКОВ<sup>1</sup>, Е.В. ШАШКОВ

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

<sup>1</sup>*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск*

## **ПРИМЕНЕНИЕ ПИКОСЕКУНДНЫХ СТРИК-КАМЕР ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОННЫХ СГУСТКОВ В УСКОРИТЕЛЯХ**

С помощью пикосекундной электронно-оптической камеры с линейной разверткой модели PS-1/S1 (стрик-камера), разработанной в ИОФ РАН, измерены временные параметры импульсов излучения Вавилова-Черенкова и синхротронного излучения в линейном ускорителе и накопителе-охладителе инжекционного комплекса ВЭПП-5 в ИЯФ СО РАН (Новосибирск). Полученные данные позволяют судить о процессах формирования электронных сгустков и их «качестве» как в самом линейном ускорителе до инжекции электронов в накопитель-охладитель, так и непосредственно в накопителе-охладителе после инжекции из линейного ускорителя. Также проведены измерения энергетического разброса пучка и импеданса вакуумной камеры в электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М и источнике синхротронного излучения СИБИРЬ-2. Делается вывод о целесообразности применения стрик-камер для достижения оптимальных параметров электронных пучков при настройке ускорителей.

**М. Ya. SCHELEV**, O.I. MESHKOV<sup>1</sup>, E.V. SHASHKOV

*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*

<sup>1</sup>*Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk*

## **PICOSECOND STREAK CAMERA APPLICATION FOR ELECTRON BUNCH DIAGNOSTICS IN ACCELERATORS**

Using a picosecond image converter camera with a linear sweep PS-1/S1 (streak camera) developed at GPI RAS, Moscow, we have measured temporal parameters of Vavilov-Cherenkov radiation pulses in linear accelerator of the VEPP-5 injection complex at the BINP SB RAS (Novosibirsk), but also of synchrotron radiation pulses on a damping ring of the mention above complex. The data obtained provide an insight into the processes of formation of electron bunches and their 'quality' both in the linear accelerator itself prior to injection of electrons into the damping ring and directly in the damping ring after injection from the linear accelerator. Beside it, the measurements of longitudinal impedance at VEPP-4M electron-positron collider and SIBERIA-2 Kurchatov synchrotron radiation source with help of PS-1/S1 streak camera are presented. A conclusion is made regarding the advisability of streak camera application for optimization of electron bunch parameters in tuning of accelerators.

До недавнего времени электронно-оптические камеры (ЭОК) наиболее широко применялись в лазерной физике, диагностике лазерной плазмы, лазерной спектроскопии и т.п. Относительно новая область применения ЭОК с линейной разверткой (стрик-камера) – это диагностика пучков частиц в линейных и циклических ускорителях. Эксперименты с использованием стрик-камеры PS-1/S1 [1, 2] проводились на крупнейших установках, действующих в России: инжекционном комплексе ВЭПП-5, являющимся источником электронных и позитронных пучков для ускорителей ИЯФ СО РАН; электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М с периметром 386 м на энергию в диапазоне 1 – 5 ГэВ, и единственном в России специализированном источнике синхротронного излучения СИБИРЬ-2, работающем в Национальном Исследовательском Центре «Курчатовский Институт».

В докладе представлены результаты экспериментов по регистрации стрик-камерой вспышек оптического излучения нано-пикосекундного диапазона, несущих информацию о физических процессах в ускорителях. На инжекционном комплексе регистрировалось излучение Вавилова-Черенкова (ИВЧ), испускаемое релятивистскими электронами при прохождении через кварцевый конус, вводимый на ось вакуумной камеры линейного ускорителя, что позволило исследовать продольное распределение частиц в пучке линака.

На этой же установке с помощью регистрации синхротронного излучения (СИ) в спектральном диапазоне 400-900 нм проведены измерения временного профиля электронных сгустков в процессе затухания пучков в накопителе-охладителе (НО) после инжекции из линака, исследованы причины разбрасывания пучка в НО по нескольким соседним сепаратрисам и измерено продольное распределение частиц в выпущенном из НО пучке.

На ускорителях ВЭПП-4М и СИБИРЬ-2 измерения с помощью ЭОК длительности вспышек СИ из поворотных магнитов позволили вычислить широкополосный импеданс вакуумной камеры и энергетический разброс пучка. Полученные данные позволяют оптимизировать режим работы установок. Камера PS-1/S1 продемонстрировала универсальность и высокую надежность при работе в условиях высокого уровня электромагнитных помех и радиационного фона.

Данная работа сделана при поддержке гранта РФФ №14-29-00295.

*Список литературы*

1. Воробьев Н.С., Горностаев П.Б., Гуров С.М. и др. // Квант. электр. 2016. Т.46. С.860.
2. Верещагин А.К., Воробьев Н.С., Горностаев П.Б. и др. // Квант.электр. 2016. Т.46. С.185.

А.Д. ИВАНОВ<sup>1</sup>, К.Н. МИНЬКОВ<sup>1,2</sup>, А.А. САМОЙЛЕНКО<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Всероссийский научно-исследовательский институт  
оптико-физических измерений, Москва*

<sup>2</sup>*Московский институт электроники и математики НИУ ВШЭ*

## **ОПТИЧЕСКИЙ МИКРОРЕЗОНАТОР КАК ПЕРВИЧНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО СЕНСОРА**

В работе приведены результаты экспериментов по детектированию наночастиц искусственного происхождения в различных средах. Показана возможность детектирования низких концентраций наночастиц вплоть до 0,05 мг/л. Приведена зависимость деградации добротности оптического микрорезонатора от массовой концентрации.

A.D. IVANOV<sup>1</sup>, K.N. MINKOV<sup>1,2</sup>, A.A. SAMOILENKO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements, Moscow*

<sup>2</sup>*Moscow Institute of Electronics and Mathematics of Higher School of Economy*

## **OPTICAL MICROCAVITY AS A PRIMARY MEASURING TRANSDUCER WITH HIGH SENSITIVITY**

The result of experiments on the synthetical nanoparticles detection in different mediums is presented. It is shown that the nanoparticles detection in low concentration incl. 0,05 mg/l is possible. It is cited Q-factor degradation dependence on mass concentration.

Благодаря своим уникальным свойствам оптические резонаторы находят свое применение в фотонике и микрофотонике. Оптические диэлектрические микрорезонаторы (ОДМР) с модами шепчущей галереи обладают высокой степенью локализации моды, а также высокой добротностью [1, 2]. Сенсоры, использующие в качестве чувствительного элемента ОДМР, способны детектировать изменение показателя преломления окружающей среды, механическую деформацию, изменение температуры, а также детектировать оптические неоднородности, которые локализованы вблизи поверхности [3].

Целью данной работы является экспериментальное исследование взаимодействия наночастиц серебра и диоксида титана с ОДМР через выпадающее поле. На рис. 1 представлена схема высокочувствительного сенсора в составе стенда. Для возбуждения мод шепчущей галереи

использовался лазер с перестраиваемой частотой на центральной длине волны 668 нм [4]. В качестве элемента связи с ОДМР использовалась прямоугольная призма. ОДМР представляет собой сферу из плавленного кварца диаметром порядка 500 мкм и добротностью не менее  $10^8$ .

В экспериментах использовался коллоидный раствор серебра с диапазоном размеров наночастиц от 55 до 65 нм, разбавленный до концентраций 5, 0,5 и 0,05 мг/л, а также использовались наночастицы диоксида титана, средний размер которых составлял 40 нм. Наночастицы диоксида титана использовались в виде аэрозоля. В процессе адсорбции наночастиц на поверхность ОДМР измерялись его частотные характеристики. Как показали эксперименты, в процессе коллективного взаимодействия наночастиц с выпадающим полем через 3-5 минут наблюдается уширение моды. Скорость уширения пика зависит от концентрации наночастиц в исследуемой среде.

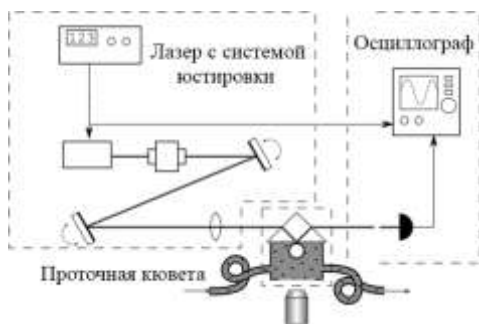


Рис. 1. Схема высокочувствительного сенсора

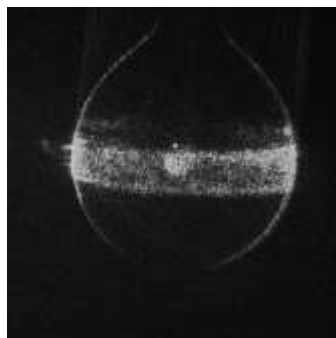


Рис. 2. Микрофотография ОДМР с адсорбированными наночастицами Ag

#### Список литературы

1. Городецкий М.Л. Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью. М: Физматлит, 2011.
2. Savchenkov A.A., Matsko A.B., Ilchenko V.S., Maleki L. Optical resonators with ten million finesse // Optics Express. 2007. V.15. P.6768-6773.
3. Foreman M.R., Swaim J.D., Vollmer F. Whispering gallery mode sensors // Advances in Optics and Photonics. 2015. V.7. No.2. P.168-240.
4. Vassiliev V.V., Zibrov S.A., Velichansky V.L. Compact extended-cavity diode laser for atomic spectroscopy and metrology // Rev. Sci. Instrum. 2006. V.77. P.1-4.

Н.В. БАРЫШНИКОВ, Д.Г. ДЕНИСОВ, В.Е. КАРАСИК,  
Е.В. КРАСНОВА, В.М. ОРЛОВ

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

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ШУМОВ В МЕТОДЕ  
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО РАССЕЯНИЯ  
НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ  
ШЕРОХОВАТОСТИ НАНОМЕТРОВОГО УРОВНЯ  
ПРОФИЛЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ**

Исследуются особенности метода дифференциального рассеяния (ARS - angle-resolved scattering), основанного на теории малых возмущений (МВ), в задачах высокоточного контроля статистического параметра поверхностных неоднородностей профилей исследуемых оптических и лазерных деталей – эффективного среднеквадратического отклонения (СКО) шероховатости по данным индикатрисы рассеяния и характера поведения спектральной плотности корреляционной функции (СПКФ). Проанализировано влияние шумов электронного тракта, рассеяние Рэлея, а так же аппаратных ограничений приёмного канала прибора на величину СКО поверхностных неоднородностей контролируемых профилей технологических изделий.

N.V. BARYSHNIKOV, D.G. DENISOV, V.E. KARASIK,  
E.V. KRASNOVA, V.M. ORLOV

*Bauman Moscow State Technical University*

**ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF NOISE IN THE ARS  
METHOD OF MEASUREMENT ERRORS  
OF PARAMETERS OF NANOMETER-LEVEL ROUGHNESS  
OF OPTICAL COMPONENTS PROFILES**

The features of the method of differential scattering (ARS - angle-resolved scattering), based on the theory of small perturbations (SP), in the tasks of high-precision control of the statistical parameters of the surface profile irregularity investigated optical and laser components - effective root mean square (RMS) of roughness according to the scattering function and the nature of the behavior of the power spectral density (PSD). The influence of the electronic channel noise, Rayleigh scattering, as well as the hardware limitations of the receiving channel of the device on the value of the measured RMS value of the effective roughness.

Задача исследования показателей качества структуры поверхностей оптических и лазерных деталей, является важной и актуальной в

оптических технологиях, поскольку оперативный высокоточный межоперационный контроль позволяет обеспечить высокие эксплуатационные и технологические показатели. В мировой практике методы, основанные на анализе индикатрис рассеянного лазерного излучения классифицируются на [1-3]: методы полного интегрального рассеяния (TIS - Total Integrated Scattering), методы определения функции распределения коэффициента отражения по двум угловым координатам (метод определения характеристики BRDF - Bidirectional Reflectance Distribution Function), методы дифференциального рассеяния (ARS). В результате проведённых научных исследований, выработаны требования к структурно - функциональной схеме прибора, к среднеквадратическому отклонению дисперсии шумов аппаратуры контроля, уровню рассеяния Рэлея, а так же к оптимальным углам подсвета и контроля вне зеркальной компоненты. Результаты математического моделирования метода ARS, при контроле высотных параметров исследуемых профилей полированных кварцевых подложек вне зеркальной компоненты индикатрисы с учётом рассмотренных ограничительных факторов, представлены на рис. 1а и б. Стоит отметить, что полученные результаты (рис. 1) позволят проводить контроль не только поверхностных неоднородностей с заданными статистическими показателями нанометрового уровня, но так же оценивать неоднородный слой оптического материала и толщину наносимых оптических покрытий.

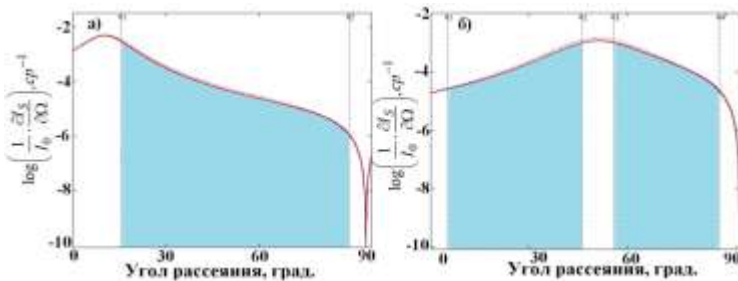


Рис. 1. Результаты моделирования метода ARS, с учётом аппаратных ограничений ОЭП, шумов электронного тракта и рассеяния Рэлея вне зеркальной компоненты индикатрисы рассеяния [2]: для поверхности с СКО 1,1 нм и длиной корреляции 0,7 мкм (а); для поверхности с СКО 0,8 нм и длиной корреляции 0,6 мкм (б)

#### Список литературы

1. Elson J.M. // The American Physical Society. 1984. V.30. P.5460-5479.
2. Азарова В.В., Дмитриев В.Г. и др. // Оптический журнал. 2002. Т.69. N2. С.71-75.
3. Денисов Д.Г., Карасик В.Е., Орлов В.М. // Метрология. 2009. №9. С.15-24.



А.В. ВЕДЯШКИНА, Б.С. РИНКЕВИЧЮС, И.Н. ПАВЛОВ  
*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФфуЗИОННОГО СЛОЯ ЖИДКОСТИ С ПОМОЩЬЮ РЕФРАКЦИИ СТРУКТУРИРОВАННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Теоретически и экспериментально исследована рефракция плоского и цилиндрического лазерных пучков в переходном диффузионном слое, возникающем при контакте двух жидкостей с различными показателями преломления. Описаны условия возникновения каустических поверхностей при зондировании диффузионного слоя жидкости структурированным лазерным излучением. Показано, что определение местоположения каустик дает дополнительную информацию при решении обратной задачи рефракции для восстановления распределения показателя преломления в оптически неоднородной среде.

A.V. VEDYASHKINA, B.S. RINKEVICHYUS, I.N. PAVLOV  
*National Research University "MPEI" (Moscow Power Engineering Institute)*

## **INVESTIGATION OF DIFFUSION LAYER OF LIQUID USING REFRACTION OF STRUCTURED LASER RADIATION**

Refraction of plane and cylindrical laser beams in the transition layer was theoretically and experimentally investigated in this work. Transition layer occurs near contact between two liquids with different refractive indexes. The conditions for the caustic surfaces occurrence when probing of diffusion-layer liquid by structured laser radiation are described. It is shown that the determination of the caustic position provides additional information for solving an inverse refraction problem to reconstruction the refractive index distribution in an optically inhomogeneous media.

В настоящее время для исследования неоднородных конденсированных сред используются оптические методы, в основе которых лежит восстановление распределения показателя преломления, после чего осуществляется количественная диагностика искомой физической величины. Одним из таких методов является лазерная рефрактография, его особенностью является использование структурированного лазерного излучения (СЛИ) [1]. При наличии сильной рефракции могут возникать каустики СЛИ, определение местоположения которых дает дополнительные возможности для решения обратной задачи восстановления свойств среды. В работе показаны

условия образования каустик СЛИ в диффузионном слое жидкостей, возникающем на границе раздела двух сред с различными физическими характеристиками. Теоретическая модель распределения показателя преломления в среде с диффузионным слоем, используемая в данной работе, описывается следующим выражением (1) [2]:

$$n(x) = n_1 + (n_1 + n_2) / \{1 + \exp[(x - x_s)/h]\}, \quad (1)$$

где  $n_1$  – показатель преломления нижней жидкости,  $n_2$  – показатель преломления верхней жидкости,  $x_s$  – середина слоя,  $h$  – полуширина слоя.

С целью наблюдения и регистрации каустик цилиндрического и плоского лазерных пучков в диффузионном слое жидкости может быть использована экспериментальная установка, изображенная на рис. 1. С помощью лазера 1 и оптической системы 2 создается СЛИ, зондирующее диффузионный слой 4 в кювете 3. Рефрактограммы 7 регистрируются с помощью цифровой камеры 5 и в дальнейшем обрабатываются на персональном компьютере 6 с помощью специально разработанного программного обеспечения 8.



Рис. 1. Экспериментальная установка для регистрации каустик СЛИ в диффузионном слое жидкости: 1 - лазер, 2 - оптическая система, 3 - кювета, 4 - диффузионный слой, 5 - цифровая фотокамера, 6 - персональный компьютер, 7 - 2D рефрактограмма, 8 - программное обеспечение

Для определения параметра  $h$  и толщины диффузионного слоя жидкости была разработана программа обработки рефрактограмм, позволяющая выполнять фильтрацию изображений, выделение из изображений каустических поверхностей и проводить их сравнение с теоретически рассчитанными. На основании данного алгоритма была определена зависимость толщины диффузионного слоя  $d$  от времени.

#### Список литературы

1. Евтихиева О.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С. Лазерная рефрактография. М.: Физматлит, 2008.
2. Ринкевичюс Б.С., Ведяшкина А.В., Павлов И.Н., Расковская И.Л., Толкачев А.В. Визуализация динамических тепловых процессов в прозрачных средах с помощью структурированного лазерного излучения // Научная визуализация. 2016. Т.8. №4. С.50-66.

**В.И. БУСУРИН, В.В. КОРОБКОВ, В.В. ДЬЯЧКОВ**

*Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)*

## **ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ВОЛНОВЫХ ГИРОСКОПОВ**

В докладе предложен метод помехозащищенной обработки, позволяющий улучшить точностные характеристики гироскопических измерительных систем, в частности – твердотельных волновых гироскопов. Метод основывается на интерферометрическом анализе колебаний чувствительного элемента датчика и многоступенчатой помехозащищенной обработке полученных данных.

**V.I. BUSURIN, V.V. KOROBKOV, V.V. DIACHKOV**

*Moscow aviation institute (national research university)*

## **INTERFEROMETRIC METHOD OF PROCESSING OF SOLID-STATE WAVE GYROSCOPES INFORMATION**

In the report a noise-protective method to improve the accuracy of gyroscopic measurement systems, in particular - wave solid-state gyroscopes, is proposed. The method is based on the interferometric analysis of the oscillation of sensing element and multi-stage noise-protective of the data processing.

Твердотельный волновой гироскоп (ТВГ) является новейшей высокоточной и высоконадежной гироскопической измерительной системой [1]. Актуальным вопросом при разработке ТВГ остается улучшение точностных характеристик, используя различные методологии обработки выходного сигнала датчика [2]. При появлении искажающих шумов в процессе обработки выходного сигнала ТВГ значительно снижаются точностные характеристики датчика, что является недопустимым для его использования в высокоточных технических системах.

Обычно в состав ТВГ входит чувствительный элемент (ЧЭ), представляющий собой полусферический резонатор [3], совместно с емкостной схемой обработки информации, которая обладает нелинейной характеристикой и подвержена влиянию электромагнитных помех.

Для повышения помехозащищенности и получения квазилинейной функции преобразования предлагается для анализа выходного сигнала ТВГ использовать интерферометрический метод обработки информации. Данный метод заключается в интерферометрическом анализе колебаний ЧЭ с последующей многоступенчатой обработкой данных. Для его реализации предлагается использовать блок обработки, состоящий из интерферометров Фабри-Перо (ИФП), узла анализа данных и быстродействующего микроконтроллера (МК).

ИФП анализирует колебания ЧЭ, полученная интерференционная картина поступает на вход фотоприемников, формирующих импульсный сигнал. Узел анализа данных на основе цифровых компараторов, на входы которых поступают сигналы с двух осей ТВГ, расположенных под углом  $90^{\circ}$  относительно друг друга, формируют цифровой сигнал управления, подаваемый на МК.

Преобразованный выходной аналоговый сигнал поступает на входы МК, который производит подсчет и анализ входных импульсов за определенный период и формирует выходной двоичный десятиразрядный код, обеспечивая режим работы реального времени.

В соответствии с функционалом данного блока обработки, предлагается алгоритм помехозащищенной обработки данных, который состоит из одиннадцати шагов обработки данных, предусматривающих регистрацию колебаний ЧЭ ИФП, анализ выходного сигнала ИФП совместно с внутренним анализом данных, исключая искажения сигнала (в т.ч. в противофазе), преобразование сигнала, сверку итоговых данных и выходную индикацию. Интерферометрический способ съема информации обеспечивает защиту от электромагнитных помех.

Использованный принцип помехозащищенной обработки информации ТВГ на основе интерферометра Фабри-Перо является достаточно простым и обеспечивает погрешность измерений в пределах 0.8%.

#### *Список литературы*

1. Лунин Б.С., Матвеев В.А., Бассараб М.А. Волновой твердотельный гироскоп. Теория и технология. М.: Радиотехника, 2014.
2. Бусурин В.И., Коробков В.В., Йин Наинг Вин Исследование характеристик кольцевого волнового оптоэлектронного преобразователя угловой скорости. // Мехатроника, автоматика и управление. 2016. Т.17. №5. С.340-346.
3. Бусурин В.И., Сапогов В.А., Дьячков В.В. Твердотельный волновой микрооптомеханический (ТВМ) преобразователь угловой скорости. // XXV Международная научно-техническая конференция «Современные технологии в задачах управления, автоматика и обработки информации». Сборник трудов. Алушта, 2016. С.45-46.

**В.С. МАКИН, Л.А. ГЛУЩЕНКО, Ю.И. ПЕСТОВ**

*Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения,  
Сосновый Бор, Ленинградская обл.*

## **ДИСТАНЦИОННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПУЛЬСОВОЙ ВОЛНЫ**

Предложен и экспериментально продемонстрирован дистанционный метод регистрации пульсовой волны путем измерения динамики спекл-структур.

**V.S. MAKIN, L.A. GLUSCHENKO, Yu.I. PESTOV**

*Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor,  
Leningrad region*

## **PULSED WAVE REMOTE SENSING**

The distant method for pulsed wave remote sensing by speckle-structures dynamic measuring has been suggested and experimentally proved.

Измерение артериального давления (АД) человека является методом диагностики его физического состояния. Для получения информации об АД используют электрокардиографирование (ЭКГ) – контактный метод, вообще говоря, искажающий проводимые измерения пульсовой волны (ПВ). В ряде случаев необходимы бесконтактные измерения, например, для пациентов с обширным поражением кожного покрова. Известны эксперименты по регистрации ПВ с использованием доплеровского виброметра [1]. Нами предложен дистанционный метод определения пульсовой волны, основанный на анализе временной последовательности видеоизображений (ПВИ) спекл-структур поверхности кожного покрова субъекта.

Оптическая схема эксперимента включает в себя следующие элементы: лазер для освещения участка тела субъекта, объектив для построения изображения удаленного объекта в виде спекл-структур, цифровую камеру для регистрации ПВИ объекта и персональный компьютер для обработки ПВИ и графического или цифрового представления результатов обработки. Обработка ПВИ осуществлялась специально разработанной программой, использующей корреляционный метод и субпиксельную обработку методом парабол. Метод позволяет регистрировать скорость перемещения объекта в плоскости его поверхности ( $X$ - $Y$ ), которая освещается лазерным излучением, падающим приблизительно по нормали к ней.

В экспериментах использовалась цифровая камера “FAST VIDEO-200”, работавшая в режиме 6000 кадров/с, захватывавшая изображения размером порядка (100x100) пикселей на дистанции до объекта 13 метров. Оценка максимального расстояния дает величину порядка сотен метров. Характерный результат обработанных измерений ПВИ в виде ПВ приведен на рис. 1, а ее спектр – на рис. 2. Из графика спектра ПВ (рис. 2) следует, что частота работы сердца субъекта составляет 1,1 Гц и сигнал носит существенно несинусоидальный характер. В настоящее время активно разрабатываются методы определения заболеваний человека путем спектрального анализа ПВ. Опыты показали (8 субъектов) индивидуальность ПВ субъекта и ее стабильность на протяжении нескольких дней. Обнаружено, что в состоянии физического напряжения субъекта его пульс учащается, и спектр ПВ усложняется, приобретает менее упорядоченный характер.



Рис. 1. Сигнал ПВ, зарегистрированный с расстояния 13 метров с запястья руки субъекта

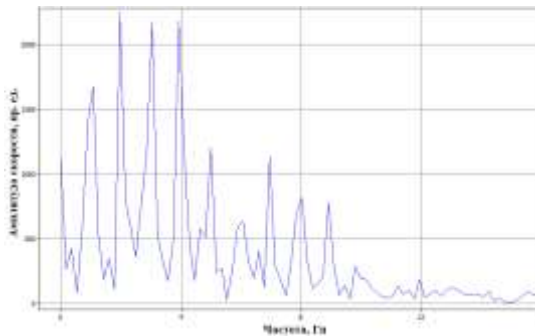


Рис. 2. Спектр сигнала, изображенного на рис. 1

*Список литературы*

1. Glushchenko L.A., Zapryagaev F.A., Makin V.S., Krokhaliev V.Ya. // Journal of Mathematics and System Science. 2012. V.2. No 7. P.404-408.

В.А. СТЕПАНОВ, В.В. БЕЛЫХ, А.А. АЙЗИКОВИЧ  
*Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова*

**ИНФОРМАЦИОННО–ЭНТРОПИЙНЫЙ МЕТОД  
КАРТИРОВАНИЯ ОРГАНОВ ГРУДНОЙ КЛЕТКИ  
ЧЕЛОВЕКА НА ОСНОВЕ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОГО  
АНАЛИЗА СТРУКТУРЫ РЕНТГЕНОГРАММ**

Рассмотрены основы ранней диагностики заболевания легких (туберкулёз) с помощью мультифрактальной параметризации структуры рентгенограммы и предложен энтропийный метод картирования органов грудной клетки человека с помощью диаграмм Вороного.

V.A. STEPANOV, V.V. BELIH, A.A. AIZIKOVICH  
*Kalashnikov Izhevsk State Technical University*

**INFORMATION-ENTROPY METHOD OF MAPPING  
THE ORGANS OF HUMAN CHEST BASED  
ON THE MULTIFRACTAL ANALYSIS  
OF THE STRUCTURE OF ROENTGENOGRAMS**

The foundations of early stage diagnostics of the disease of the lungs (tuberculosis) of the multifractal parametrization of the structure of X-ray photograph are considered and entropy mapping technique the organs of human chest by Voronoi decomposition is proposed.

Фрактальный анализ структуры различных материалов живой и неживой природы устанавливает спектр фрактальных размерностей Реньи, для определения свойств этих структур [1]. Фрактальный подход расширяет исследование связи структурных параметров изображения с диагнозом состояния лёгких [2]. Для отражения состояний и диагностики в медицине и биологии применяется метод динамического картирования [3, 4]. Предлагаемый метод мультифрактального анализа рентгенограмм (флюорограмм) органов грудной клетки создает математическое облако (МО) фрактальных размерностей из спектра Реньи по оптическим срезам и всего облака в целом.

Цель работы: Определение центра тяжести МО для определения свойств структур легкого и построения карты состояния гомеостаза. Для анализа рентгенограммы ограничили рассмотрением десяти оптических

срезов. Центр тяжести (ЦТ) математического облака вычисляется по известным методикам расчёта [5]. Зная динамику изменения ЦТ и диагноз состояния лёгкого можно прогнозировать характер заболевания на ранних стадиях патологии [6]. После определения ЦТ всего математического облака в целом для различных заболеваний, с помощью диаграмм Вороного, строится информационно – энтропийная карта гомеостаза, представленная на рис. 1.

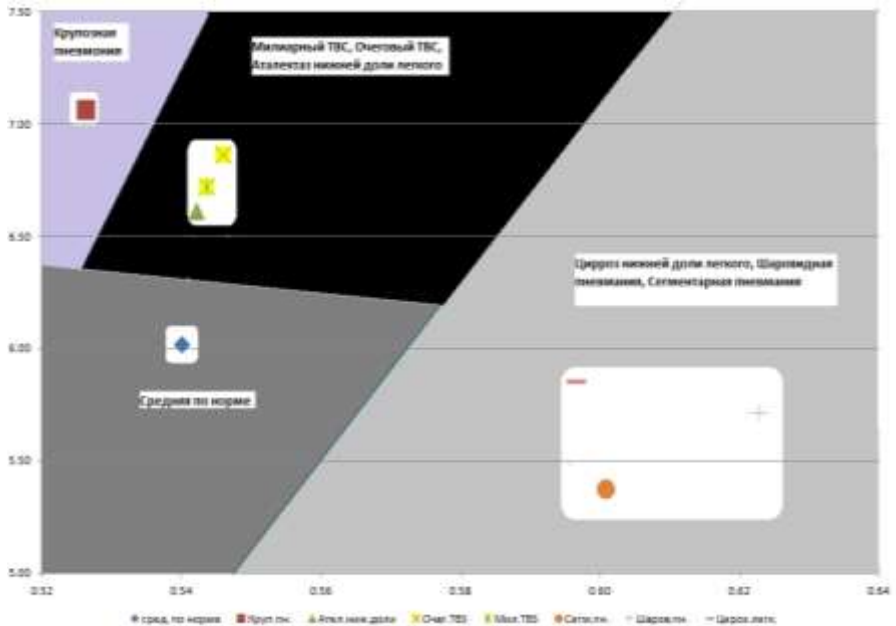


Рис. 1. Информационная карта ЦТ математического облака на оптическом срезе

#### Список литературы

1. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксогоев А.А. Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука, 1994.
2. Иванников В.П., Степанов В.А., Белых В.В., Суфиянов В.Г. Фрактальный анализ рентгенограмм. // Вестник ИжГТУ. 2009. №3. С.150-154.
3. Платонов С.А., Годик Э.Э., Тараторин А.М., Каргашин А.Ю. Информационные задачи функционального картирования биологических объектов. // Радиотехника. 1991. №8.
4. Trochim W., Kane M. Concept mapping: an introduction to structured conceptualization in health care. // International Journal for Quality in Health Care. 2005. V.17. №3. P.187-191.
5. Гусак А.А. Справочник по высшей математике. Минск: Тетра Системс. 2004.
6. Баевский Р.Н. Концепция физиологической нормы и критерии здоровья // Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова. 2003. Т.89. №4. С.473–489.



В.Д. ЗВЕРЖХОВСКИЙ, А.В. КРЕТУШЕВ,  
А.А. ЕВДОКИМОВ, Ю.К. ФЕТИСОВ  
*Московский технологический университет (МИРЭА)*

## **СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ФАЗОВОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖИВЫХ Т–ЛИМФОЦИТОВ**

Проведён сравнительный анализ фазовых изображений живых Т-лимфоцитов, полученных методами когерентной фазовой микроскопии (КФМ) и гильберт - фазовой микроскопии (ГФМ). Приведены параметры внутриклеточных структур Т-лимфоцитов, определенные методами ГФМ и КФМ.

V.D. ZVERZHKOVSKIY, A.V. KRETUSHEV,  
A.A. EVDOKIMOV, Yu.K. FETISOV  
*Moscow Technological University (MIREA)*

## **THE COMPARISON OF DIFFERENT PHASE MICROSCOPY METHODS TO LIVING T-LYMPHOCYTES DETERMINATION**

A comparative analysis of phase images of living T-lymphocytes obtained by coherent phase microscopy (CPM) and Hilbert phase microscopy (HPM) was carried out. Intracellular structures T-lymphocyte's parameters determined using the HPM and CPM methods are given in this paper.

Исследования морфо-функциональных состояний живых клеток имеет важное фундаментальное и практическое значение для биологии клетки и диагностики в медицине. Когерентная фазовая микроскопия (КФМ) позволяет получить количественные данные о фазовой толщине клетки и её флуктуациях с точностью до единиц нанометров. По сравнению с другими методами оптической фазовой микроскопии [1] в КФМ сочетаются высокая чувствительность по фазовой толщине (до 1 нм), высокое пространственное разрешение (до 50 нм) и высокое временное разрешение (до 1 мс) [2-5].

Для анализа морфологии и прижизненных динамических процессов в клетках мы использовали когерентный фазовый микроскоп «Эйрискан» [2], в котором измерения оптической разности хода производились компенсационным методом при периодической модуляции фазы волны в опорном плече модифицированного интерферометра Линника. В качестве источника использован He-Ne лазер 0,6328 нм.

С развитием вычислительной техники широкое распространение получил метод Гильберт преобразования интерферограмм в фазовое изображение (ГФМ). Этот метод был реализован нами на базе микроинтерферометра Линника (МИИ-4) с некогерентным источником света. Интерферограммы регистрировались при помощи цифровой камеры с разрешением 14 мегапикселей. Последующая обработка полученных фазовых изображений проводилась с использованием интегральных функций площади и объёма ( $S$  и  $W$ ) фазового изображения [4, 5]. В качестве объекта для сравнительного анализа методов были выбраны Т – лимфоциты, выделенные из венозной крови. Полученные изображения живого Т – лимфоцита приведены на рис. 1.

Оба метода показали близкие результаты. Однако метод КФМ даёт дополнительную возможность диагностики на клеточном и субклеточном уровне по интенсивности и характерным частотам флуктуаций фазовой толщины. Тем не менее, для измерения Т – лимфоцитов предпочтительнее метод ГФМ в связи с меньшей инвазивностью и меньшей трудоемкостью исследований.

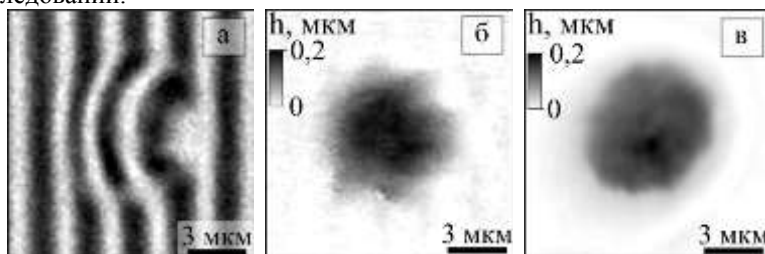


Рис. 1. Интерференционное и фазовые изображения Т – лимфоцитов: интерференционное изображение (а); фазовое изображение, полученное ГФМ (б); фазовое изображение, полученное методом КФМ (в)

Работа выполнена при поддержке гранта Минобрнауки России по проектной части государственного задания № 8.344.2014/К.

#### Список литературы

1. Левин Г.Г., Вишняков Г.Н., Минаев В.Л. Автоматизированный интерференционный микроскоп для измерения динамических объектов. // ПТЭ. 2014. №1. С.79-84.
2. Тычинский В.П. Когерентная фазовая микроскопия внутриклеточных процессов. // УФН. 2001. Т.171. №6. С.649-662.
3. Кретушев А.В., Тычинский В.П. Сверхразрешение на сингулярных участках фазовых изображений. // Квантовая электроника. 2002. Т.32. №1. С.66-70.
4. Tychinsky V.P., et al. Dissecting eucariotic cells by coherent phase microscopy: quantitative analysis of quiescent and activated T lymphocytes. // JBO. 2012. V.17(7). P.22-28.
5. Звержховский В.Д. и др. // Вестник МГТУ МИРЭА. 2015. №4(1). С.292-296.

Н.А. ТАЛАЙКОВА<sup>1</sup>, В.П. РЯБУХО<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Саратовский национальный исследовательский государственный университет*

<sup>2</sup>*Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов*

## **ПРОЯВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОГЕРЕНТНОСТИ В ДИФРАКЦИОННОЙ ФАЗОВОЙ МИКРОСКОПИИ**

Исследовано влияние пространственной когерентности в методе дифракционной фазовой микроскопии, которая объединяет в себе микроскопический метод исследования и голографический метод регистрации. Экспериментальные величины степени когерентности получены для когерентных и частично-когерентных источников с длинами волн диапазона 470-633 нм.

N.A. TALAIKOVA<sup>1</sup>, V.P. RYABUKHO<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Saratov National Research State University*

<sup>2</sup>*Institute of Precision Mechanics and Control of the RAS, Saratov*

## **MANIFESTATION OF THE SPATIAL COHERENCE EFFECTS IN EXPERIMENTS BY DIFFRACTION PHASE MICROSCOPY**

We research effects of spatial and temporal-spatial coherence in diffraction phase microscopy. It is method of optical microscopy which modernize by Mach-Zender interferometer. We research changes in optical thickness values of phase object for different light sources as coherent/incoherent (LED, lasers, SLD), comparing and analyze results for different central wavelength of the sources.

Методы количественной фазовой визуализации широко применяются в исследованиях технических и биологических объектов на клеточном уровне [1, 2]. В литературе широко известен метод дифракционной фазовой микроскопии (рис. 1а), как оптический метод, в котором фаза объекта восстанавливается из интерференционной картины, причем для исследований динамически изменяющихся объектов используется покадровая запись интерференционных картин, ограничивающаяся скоростью регистрации приемника изображения [1, 2].

В данной работе проведено исследование влияния когерентных свойств источника освещения, применяющегося в эксперименте на основе метода дифракционной фазовой микроскопии, на регистрируемый сигнал.

В методе дифракционной фазовой микроскопии факторами, определяющими взаимную пространственную когерентность световых полей, формирующих интерференционную картину в плоскости

регистрации, являются: размеры и форма источника освещения, период штрихов дифракционной решетки и их размер, взаимное расположение окон пространственного фильтра SF и размер окна пространственной фильтрации опорного пучка. Различие интенсивностей световых полей, формируемых пространственным фильтром в данном методе, можно компенсировать при подборе параметров дифракционной решетки, с учетом того, что интенсивность нулевого порядка дифракции до фильтрации должна быть выше интенсивности первого порядка в  $e$  раз, при отношении размеров окон пространственных спектров 1:20.

Исследование показало, что значение степени когерентности для лазерного источника выше, чем для светодиода, но изображение модулировано спеклами (рис. 1б и 1в). В данном методе степень пространственной когерентности  $\gamma$  зависит от положения окон пространственного фильтра в пространстве друг относительно друга ( $0.2 \leq \gamma < 0.75$  в эксперименте с когерентным источником, минимальное значение определено на границе пространственного спектра 0-го порядка, максимальное в центральной области  $d=10$  мкм). Так же выявлено, что значительное различие в значении измеряемой величины наблюдается при изменении формы источника; и слабо зависит от длины волны источника, ширины спектра и числовой апертуры осветительной системы ( $\gamma \approx 0.2$  для  $NA \approx 0.75$ ,  $\gamma \approx 0.3$  для  $NA \approx 0.004$ ,  $\lambda_2 = 0,63$  мкм).

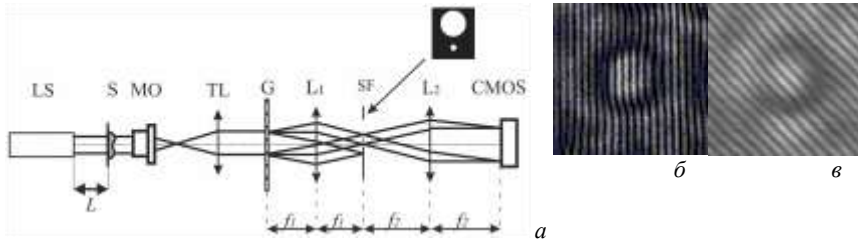


Рис. 1. Экспериментальная схема дифракционного фазового микроскопа: LS – источник света, S – исследуемый объект, MO – микрообъектив, TL – тубусная линза, G – дифракционная решетка,  $L_{1,2}$  – линзы, SF – пространственный фильтр, CMOS – цифровая камера,  $L$  – перемещение источника света,  $f_{1,2}$  – фокусные расстояния линз  $L_{1,2}$ , соответственно (а), примеры интерференционных картин в лазерном (б) и частично-когерентном (в) свете

#### Список литературы

1. Baek Y., Lee K., et al. // Opt. Express. 2016. V.24. P.9308-9315.
2. Bhaduri B., Edwards C., et al. // Adv. in Optics and Photonics. 2014. V.6. P.57–119.

И.Н. ПАВЛОВ, Б.С. РИНКЕВИЧИУС,  
А.В. ТОЛКАЧЕВ, А.В. ВЕДЯШКИНА  
*Национальный исследовательский университет «МЭИ»*

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПОВЕРХНОСТНОГО  
ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСА ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ  
ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В ПРИСТЕНОЧНОМ СЛОЕ  
КАПЛИ ВОДЫ**

Приведено описание оптического метода поверхностного плазмонного резонанса для исследования свойств тонкого пограничного слоя среды. Описана созданная экспериментальная установка, реализующая данный метод. Приведены результаты экспериментов по визуализации процессов испарения и кристаллизации капли дистиллированной воды. Определены особенности наблюдения указанных процессов этим методом по сравнению с методом нарушенного полного внутреннего отражения.

I.N. PAVLOV, B.S. RINKEVICHYUS,  
A.V. TOLKACHEV, A.V. VEDYASHKINA  
*National Research University "MPEI" (Moscow Power Engineering Institute)*

**APPLICATION OF SURFACE PLASMON RESONANCE  
METHOD FOR VISUALIZATION OF PHASE TRANSITIONS  
IN A NEAR-WALL LAYER OF WATER DROPLET**

Description of the optical method of surface plasmon resonance used for investigation of thin boundary medium's layer properties is given. Created experimental setup implementing this method is described. The experimental results on visualization of evaporation and crystallization processes are shown. The features of observation of these processes by this method compared with method of frustrated total internal reflection are determined.

Метод поверхностного плазмонного резонанса основан на возбуждении поверхностных плазмонов (колебаний плотности свободных электронов в поверхностном слое металла) с помощью эванесцентной волны, возникающей при полном внутреннем отражении света внутри стеклянной призмы [1]. При этом, несмотря на выполнение условия полного внутреннего отражения, интенсивность отраженного света меньше интенсивности падающего, так как часть энергии падающего пучка затрачивается на возбуждение поверхностных плазмонов. Более

того, существуют определенные резонансные условия (поляризация падающего излучения, угол его падения, показатель преломления тонкого пограничного слоя исследуемой среды, толщина металлической пленки), при которых интенсивность отраженного света вообще равна нулю. Чувствительность наблюдаемого в эксперименте резонанса к указанным выше условиям обуславливает возможность создания датчиков и измерительных устройств для обнаружения малых отклонений показателя преломления (до  $10^{-6}$ ) от резонансных значений. На этом основан принцип работы созданной экспериментальной установки, схема которой показана на рис. 1 [2].

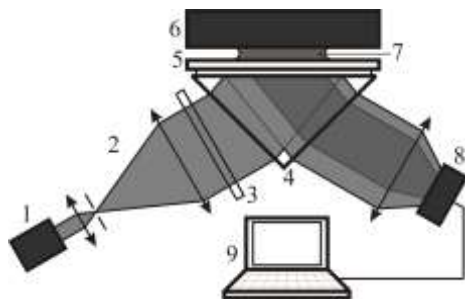


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – лазер, 2 – расширитель пучка, 3 – поляризатор, 4 – стеклянная призма, 5 – стеклянная пластинка с металлическим напылением, 6 – элемент Пельтье, 7 – исследуемая капля, 8 – цифровая видеокамера, 9 – ПК

С помощью этой установки были получены экспериментальные результаты по визуализации динамики протекания процесса кристаллизации капли дистиллированной воды, охлаждаемой с помощью элемента Пельтье. В отсутствие этого элемента установка позволяет визуализировать динамику испарения капель жидкостей. Полученные результаты были сравнены с аналогичными результатами, полученными ранее с помощью метода нарушенного полного внутреннего отражения.

К сожалению, нет возможности привести все выявленные особенности, полученные в результате этого сравнения, поэтому перечислим основные из них: метод поверхностного плазмонного резонанса обладает большей чувствительностью по показателю преломления и позволяет избавиться от вредных интерференционных эффектов, но более сложен в реализации.

#### Список литературы

1. Kihm K.D. // Experiments in fluids. 2010. V.48. No 4. P.547-564.
2. Pavlov I.N., Rinkevichyus B.S., et. al. // JPCS. 2016. V.737. P.012044.

И.А. АРТЮКОВ, А.С. БУСАРОВ,  
А.В. ВИНОГРАДОВ, Н.Л. ПОПОВ  
*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

## **РЕНТГЕНОВСКАЯ ЛИТОГРАФИЯ И МИКРОСКОПИЯ ПРИ НАКЛОННОМ РАСПОЛОЖЕНИИ МАСОК И ОБЪЕКТОВ**

В работе рассматривается оптическая схема рентгеновского микроскопа, работающего на отражении при скользких углах падения, предложен новый метод рентгеновской литографии с отражающей маской, а также приведены результаты численного моделирования.

I.A. ARTUKOV, A.S. BUSAROV,  
A.V. VINOGRADOV, N.L. POPOV  
*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

## **X-RAY LITHOGRAPHY AND MICROSCOPY AT THE INCLINED ARRANGEMENT OF MASKS AND OBJECTS**

An optical scheme of X-ray reflection microscope working at sliding angles of object illumination is considered. A new method of X-ray lithography with the reflecting mask is suggested, and the results of numerical modeling are presented.

В настоящее время существует потребность исследования поверхностей различных материалов и процессов на нано масштабах, таких как абляция, фазовые переходы и др. [1]. Чтобы наблюдать их, нужна длина волны, которая сможет обеспечить соответствующее разрешение. С одной стороны, чем меньше длина волны, тем выше разрешение можно получить. С другой стороны, с уменьшением длины волны источники и оптика становятся менее доступны. С учётом указанных факторов, а также длины пробега фотонов во многих задачах нано физики и нанотехнологий наблюдения ведутся с помощью излучения с энергией фотонов 0,1-10 кэВ. Поскольку исследуются поверхности и плёнки на них, то изображения естественно получать с помощью микроскопа, использующего отражение от поверхности образца. Однако при таких длинах волн существенная доля излучения отражается лишь при малых углах падения  $\leq 10^\circ$ . Таким образом,

появляется идея создания рентгеновского микроскопа, работающего на отражении при скользящих углах падения [1].

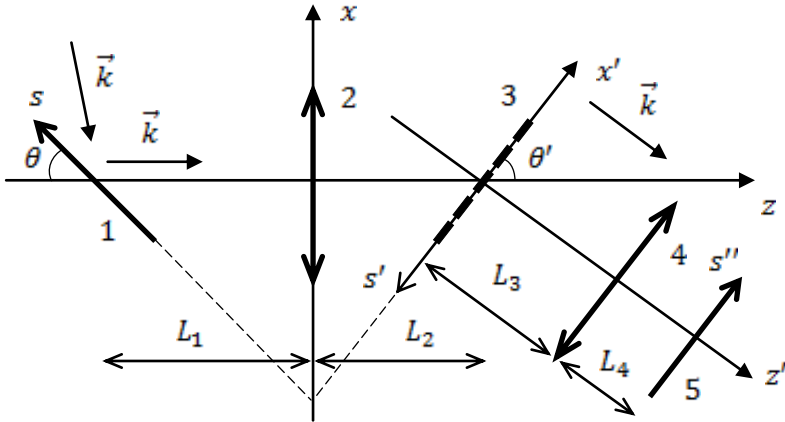


Рис. 1. Оптическая схема рентгеновского микроскопа: 1 - объект, 2 и 4 - линзы, 3 - дифракционная решетка, 5 - изображение (детектор); плоскости объекта и дифракционной решетки являются оптически сопряженными относительно линзы 2, также как плоскости дифракционной решетки и изображения являются оптически сопряженными относительно линзы 4

В данной работе рассматривается оптическая схема такого микроскопа (рис. 1). При освещении объекта под скользящими углами изображение формируется в плоскости, расположенной также под малым углом к направлению распространения пучка. Если в этом месте поставить детектор, то излучение отразится и от него. Поэтому перед тем как записывать изображение его нужно вначале «развернуть», а уже затем увеличить и записать. Что и предложено в оптической схеме на рис. 1.

Аналогично предложен метод литографии под малым углом скольжения к отражающей маске.

#### Список литературы

1. Baba M., Nishikino M., Hasegawa N., Tomita T., Minami Y., Takei R., Yamagiwa M., Kawachi T., Suemoto T. Submicron scale image observation with a grazing incidence reflection-type single-shot soft X-ray microscope // Japanese Journal of Applied Physics. 2014. V.53. P.080302.



В.А. КОМОЦКИЙ, Ю.М. СОКОЛОВ, Н.В. СУЕТИН  
*Российский университет дружбы народов, Москва*

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ МОДУЛЯЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Предлагаемое устройство с механическим приводом может обеспечить периодическую модуляцию мощности лазерного излучения с частотами до сотен кГц. В основе работы устройства лежит явление последовательной дифракции лазерного пучка на двух фазовых дифракционных решетках с прямоугольным профилем.

V.A. KOMOTSKII, Yu.M. SOKOLOV, N.V. SUETIN  
*Peoples' Friendship University of Russia, Moscow*

## DEVICE OF A NEW TYPE FOR PERIODICAL MODULATION OF LASER RADIATION

A new design of laser modulator with modulation frequencies up to hundreds kHz is proposed. The device is based on phenomenon of serial diffraction of laser beam passing through two phase diffraction gratings with rectangle profile.

Схема устройства (рис. 1) включает лазер (1), прозрачный диск (2) с нанесённой на диске фазовой дифракционной решёткой (ДР) (3), двигатель (4), который вращает диск (2). Кроме того, схема содержит неподвижную фазовую ДР (5), идентичную первой ДР, нанесённой на диске, диафрагму (6) для выделения одного из дифракционных порядков.

Модуляция лазерного излучения осуществляется в результате последовательной дифракции лазерного пучка с длиной волны  $\lambda$  на двух фазовых ДР (3 и 5) с одинаковыми периодами, равными  $\Lambda_p$ . Одна из решёток – движущаяся – расположена на поверхности прозрачного вращающегося диска. Вторая решётка – неподвижная, расположена в плоскости, параллельной плоскости первой решётки, на малом расстоянии  $\ell_z$  от плоскости первой решётки ( $\ell_z \ll \Lambda_p^2 / \lambda$ ). ДР образованы **прямоугольными рельефными структурами** из прозрачного материала на поверхностях прозрачных подложек. Оптимальной является форма, при которой ширина выступа рельефа дифракционной решётки равна ширине впадины и равна половине периода решётки (меандр). При этом, как показывает теоретический анализ [1, 2], форма модуляции мощности излучения в **первых**

порядках дифракции на выходе схемы модулятора будет *чисто гармонической*. В *нулевом порядке* форма модуляции мощности отличается от гармонической и имеет вид последовательности импульсов, форма которых зависит от расстояния  $\ell_z$  (рис. 2).

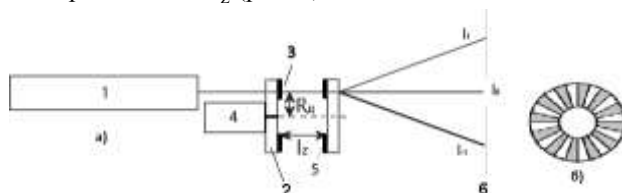


Рис. 1. Схема модулятора с двумя фазовыми ДР (а), вид ДР, входящих в состав модулирующего блока, темные сектора – углубления на диске (б)

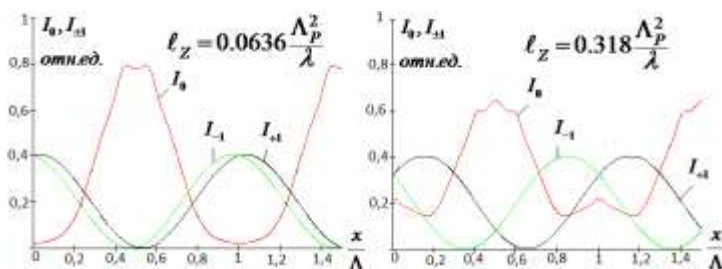


Рис. 2. Графики зависимостей интенсивностей в нулевом и первых порядках дифракции от смещения одной решетки относительно другой при различных расстояниях между ДР

Частота модуляции дифрагированных пучков на выходе схемы в первых порядках и в нулевом порядке дифракции равна:  $F_M = V / \Lambda_p$ , где  $V$  – линейная скорость движения поверхности вращающегося диска в области прохождения лазерного пучка через блок из двух ДР;  $V = 2 \cdot \pi \cdot R_d \cdot n$ , При расстоянии решётки от оси вращения:  $R_d = 50$  мм, при частоте вращения диска  $n = 100$  об/с, и если периоды дифракционных решёток равны  $\Lambda_p = 0,2$  мм, частота модуляции мощности лазерного пучка составит:  $F_M = 157$  кГц. На практике моделирование работы этого типа было проведено на макете с использованием лазера 0.63 мкм и показало хорошее соответствия расчетных и экспериментальных зависимостей.

#### Список литературы

1. Комоцкий В.А., Соколов Ю.М. // Вестник РУДН. Сер. Физика. 2006. №1. С.90-95.
2. Комоцкий В.А., Соколов Ю.М., Корольков В.И. // Фотоника. 2011. №1 (25). С.16-19.

И.С. ГИБИН, Е.С. НЕЖЕВЕНКО

*Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск*

## **ОПТИКО-ЭЛЕКТРОНАЯ СВЁРТОЧНАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Обосновывается возможность и целесообразность реализации свёрточной нейронной сети (СНС) в оптоэлектронном варианте. Выбирается вариант реализации оптоэлектронной свёртки изображений и его элементная база. Анализируется вычислительная производительность оптоэлектронной СНС и ее конкурентоспособность по отношению к цифровой электронике.

I.S. GIBIN, E.S. NEJEVENKO

*Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk*

## **OPTOELECTRONIC CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK FOR IMAGES RECOGNITION**

Capability and practicability of convolutional neural network in optoelectronic variant are proved. The variant of implementation of optoelectronic image folding and its element basis are chosen. Calculating efficiency of optoelectronic convolutional neural network and its competitive ability (marketability) towards digital electronics are analyzed.

В 70-х, начале 80-х годов прошлого века появилось много публикаций, в которых приводились исследования по оптическим и оптоэлектронным корреляторам для распознавания изображений. Предполагалось, что они произведут революцию в этой области ввиду очень эффективного вычисления функции взаимной корреляции изображений. Однако вскоре выяснилось, что, коэффициент корреляции, вычисляемый в корреляторе, - довольно слабый критерий распознавания, И к тому же гигантские успехи цифровой электроники свели на нет конкурентоспособность оптики. Мы хотим показать, что разумный симбиоз оптики и электроники может привести к эффективному решению в такой области науки и техники, как распознавание изображений. В конце прошлого века французским исследователем Яном Лекуном была предложена свёрточная нейронная сеть [1]. В настоящее время такая сеть в комбинации с глубоким обучением считается одним из самых успешных решений проблемы распознавания изображений. Распознавание в свёрточной нейронной сети разбивается на два этапа. Сначала идет глубокое обучение – в качестве

обучающей выборки используются тысячи изображений, причем процесс этот очень протяженный, алгоритмы обучения сложные и здесь альтернатива цифровой ЭВМ появится не скоро. А вот второй этап – собственно распознавание – мы предлагаем проводить в оптоэлектронном процессоре (ОЭП), показанной на рис. 1. Пусть требуется вычислить свёртку  $(f * g)[m, n] = \sum_{k, l} f[m - k, n - l] \cdot g[k, l]$ . Здесь  $f[k, l]$  – карта признаков (или входное изображение), а  $g[k, l]$  – ядро.  $f[k, l]$  записывается на электрически управляемом транспаранте. На линейку светодиодов подается первая строчка ядра  $g[k, 1]$ . На ПЗС матрицу в режиме ВЗН проецируются смещенные функции карты признаков, каждая из которых промодулирована (путем широтно-импульсной модуляции) в соответствии со значением элемента ядра. В этом некогерентном конвольвере вычисляется  $\sum_k f[m - k, n - 1] \cdot g[k, 1]$ . Затем подается строчка ядра  $g[k, 2]$ , а накопленный на предыдущей стадии зарядовый рельеф сдвигается на один такт. Таким образом, накопление идет в течение  $l$  тактов, в результате чего вычисляется  $(f * g)[m, n]$ .

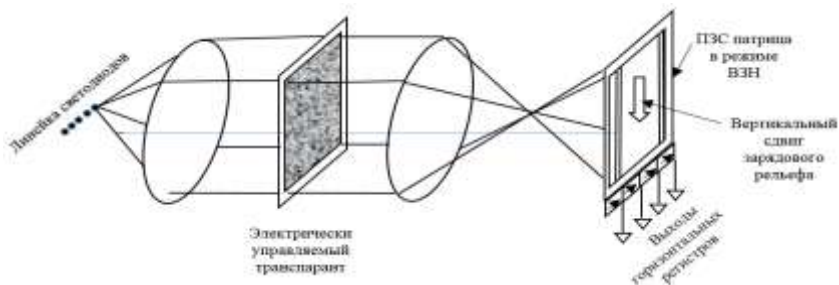


Рис. 1. Оптоэлектронный конвольвер

Оценка вычислительной производительности такого конвольвера дает порядок  $0,5 \cdot 10^{12}$  опер/сек. Такое быстродействие вполне сопоставимо со скоростью вычисления в современных компьютерах. Конечно, их вычислительная производительность будет расти, однако и в ОЭП есть резервы, как по части управляемого транспаранта, так и на пути совершенствования параметров ПЗС матрицы.

#### Список литературы

1. LeCun Y., Bengio Y. Convolutional Networks for Images, Speech, and Time-Series //, in The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. MIT Press, 1995.

**А.Ю. БЫКОВСКИЙ, А.А. ЩЕРБАКОВ<sup>1</sup>**

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

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

## **МОДЕЛИ МНОГОЗНАЧНОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕДУР КЛАССИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ**

Классификатор на базе  $k$ -значной алгебры Аллена-Живона позволяет получить точное логическое выражение для произвольно заданной границы класса объектов и разделяющей гиперповерхности, независимо от числа переменных.

**A.Yu. BYKOVSKY, A.A. SHERBAKOV<sup>1</sup>**

*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

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

## **MULTIPLE-VALUED LOGIC MODELS FOR OBJECTS CLASSIFICATION**

The classifier based on the  $k$ -valued Allen-Givone algebra provides the precise logic expression for an arbitrary class boundary and a separating hypersurface regardless on the number of used variables.

Для решения задачи распознавания образов и классификации объектов в оптоэлектронных робототехнических системах часто используют известные подходы нейронных сетей и нечеткой логики [1], поскольку такие системы удобны для построения процедур обучения.

В данной работе в качестве устройства распознавания образов и классификации объектов предлагается использовать логический классификатор, реализуемый на базе функций  $k$ -значной алгебры Аллена-Живона [2], где все входные и выходные переменные могут принимать значения истинности 0, 1, 2, ...,  $k-1$ .

Принцип построения МЗЛФ классификатора показан на рис. 1, где местоположение точечных объектов описывается переменными  $x_1$  и  $x_2$ . Оцифрованные данные для двух классов объектов А и В отображают на 2D дискретную сетку ( $x_1, x_2$ ) значений истинности. Далее с помощью логических операторов Литерал ( $X_1(a,b)$ ), MIN(\*) и MAX(+) может быть корректно записано логическое выражение для произвольного числа переменных и произвольно расположенных объектов определенного класса. Например, для класса А может быть записано выражение вида:

$$F_A(x_1, x_2) = \text{Const}_A * X_1(1,1) * X_2(3,3) + \text{Const}_A * X_1(2,2) * X_2(3,3) + \quad (1) \\ + \text{Const}_A * X_1(3,3) * X_2(3,3) + \text{Const}_A * X_1(2,2) * X_2(4,4) + \dots,$$

где  $\text{Const}_A$  характеризует все объекты класса А. Точное логическое выражение (1) может быть использовано классификатором как непосредственно, так и после минимизации (т.е. упрощения).

Обучение системы с добавлением нового объекта к классу А, например, объекта в ячейке (5,5), соответствующее формированию расширенного класса объектов  $A'$ , осуществляется дописыванием соответствующего минтерма в (1). Удаление объекта выполняется вычеркиванием указанного минтерма.

Кроме того, выражения вида (1) позволяют полностью или фрагментарно описать границу или разделяющую гиперповерхность различных классов объектов. Например, вместо разделяющей поверхности для классов А и В может быть задан слой толщиной  $\varepsilon$ , все элементы которого будут характеризоваться константой  $\text{Const}_\varepsilon$ . При анализе данных внутри слоя могут быть также заданы вспомогательные разделяющие прямые 1 и 2 (или гиперповерхности).

Для быстрой работы классификатора потребуется регулярно проводить минимизацию выр. (1), что для большого числа переменных может резко увеличить объем вычислений и потребовать специальных схем параллельной обработки.

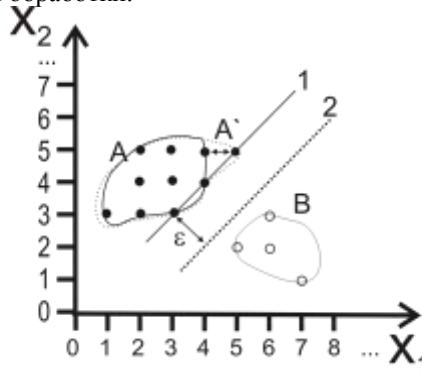


Рис. 1. Принцип построения МЗЛФ-классификатора объектов, описываемых переменными  $x_1$  и  $x_2$

*Список литературы*

1. Рутковская Д., Пилинский М. и др. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. М.: Горячая линия-Телеком, 2006.
2. Bykovsky A.Yu., Sherbakov A.A. // J. of Physics: Conf.Series. 2016. V.737. P.012059.

А.В. ПАВЛОВ

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ РЕГИСТРИРУЮЩИХ СРЕД НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЫДЕЛЕНИЯ КОРРЕЛИРОВАННЫХ ФРАГМЕНТОВ МЕТОДОМ НАЛОЖЕННЫХ ГОЛОГРАММ

Исследована связь оценки эффективности выделения общих фрагментов в серии образов, записываемых методом наложенных голограмм Фурье, с толщиной и динамическим диапазоном голографических регистрирующих сред.

A.V. PAVLOV

*ITMO University, Saint-Petersburg*

## ON THE EFFECTIVENESS OF CORRELATED PARTS DETECTING BY THE SUPERIMPOSED HOLOGRAMS METHOD IN DEPENDENCE OF THE PROPERTIES OF RECORDING MEDIA

Revealing of common parts of patterns series recorded by superimposed Fourier holograms in dependence of the thickness and dynamical range of holographic recording media is investigated.

Одна из задач обработки информации – обобщение, т.е. выявление в серии образов общих фрагментов при отсутствии иных, кроме частоты появления, априорных критериев общности. В статьях [1, 2] показано, что задача выявления коррелированных фрагментов может быть решена методом наложенных голограмм (НГ) Фурье (1), записанных по схеме совместного преобразования (рис. 1)

$$H(v_x) = \sum_{i=1}^n F(S_i(x)) F^*(R_i(x)) \exp(-j2\pi v_x(x_i^R + x_i^S)), \quad (1)$$

где  $v_x$  – пространственная частота,  $F$  – символ преобразования Фурье, астериск – комплексного сопряжения, экспоненциальный член описывает пространственное положение сигнальных  $S$  и опорных  $R$  образов при записи НГ,  $j$  – мнимая единица. Согласно [1, 2], условия решения задачи:

1) требование на постоянство расстояния между образами  $S_i$  и  $R_i$

$$\forall i, j \in [0, n]: x_i^R - x_j^R = x_i^S - x_j^S;$$

2) частичная коррелированность  $\rho^R$  опорных образов  $R_i$ .

В развитие [1, 2], в работе исследовано влияние свойств голографических регистрирующих сред (ГРС) на оценку эффективности выявления общих фрагментов. Показано, что для тонких по критерию угловой инвариантности ГРС оценка эффективности выявления

$$V(n) \approx \left(1 + \rho_{kl}^{(R)}(n-1)\right)^2 \left\{ n \left(1 + (n-1) \sqrt{\frac{2\kappa}{\Omega^C}}\right) \right\}^{-1}, \quad (2)$$

где  $\Omega^C = L_x^C L_y^C (\pi r_{\text{out}}^2)^{-1}$  – корреляционная оценка информационной емкости коррелированных фрагментов,  $\kappa$  – параметр, зависящий от вида функции корреляции. Можно видеть, что  $\lim_{n \rightarrow \infty} V(n) = \rho_{kl}^{(R)} \sqrt{\frac{\Omega^U}{2\kappa}}$ , т.е. эффективность выявления с ростом  $n$  насыщается (рис. 2). Напротив, при использовании объемных по критерию угловой селективности ГРС зависимость  $V(n)$  имеет линейный характер, тангенс угла наклона определяется  $\rho^R$ .

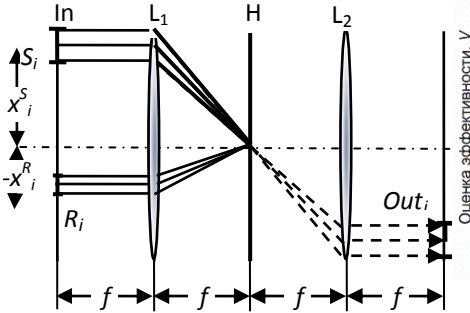


Рис. 1. 4f схема голографии Фурье при записи наложенных голограмм по схеме совместного преобразования

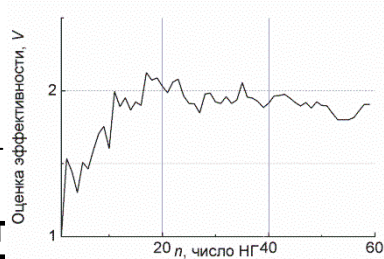


Рис. 2. Зависимость эффективности выявления от числа НГ для тонкой ГРС (численный эксперимент)

Поскольку входящий в выражении для корреляционной оценки информационной емкости общих фрагментов радиус корреляции зависит от динамического диапазона ГРС, то показана зависимость оценки эффективности выявления от динамического диапазона ГРС.

Теоретические выводы иллюстрированы результатами численных экспериментов.

Работа поддержана РФФИ, проект 15-01-04111-а.

#### Список литературы

1. Павлов А.В. // Известия ВУЗов. Физика. 2015. Т.58(10). С.80-86.
2. Павлов А.В. // Квантовая электроника. 2016. Т.46(8). С.759-765.



П.А. ИВАНОВ

*Ярославский государственный технический университет*

## **ПОЛИНОМИАЛЬНЫЕ И DCC-ФИЛЬТРЫ В ЗАДАЧАХ РАСПОЗНАВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИ ИСКАЖЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Приводятся результаты моделирования на ПЭВМ распознавания двумерных полутоновых изображений, подвергнутых геометрическим преобразованиям, с помощью составных фильтров МСЭК, MINACE, полиномиальных и DCCF.

P.A. IVANOV

*Yaroslavl State Technical University*

## **DCCF AND POLYNOMIAL FILTERS IN PROBLEMS OF DISTORTED IMAGES RECOGNITION**

The results of PC modeling of 2D grayscale images with geometrical deformations recognition are given. There were used several distortion invariant correlation filters: MACE, MINACE polynomial and DCCF.

Привлекательным подходом к решению задачи распознавания изображений, полученных при аэрофотосъемке местности или объектов, находящихся в состоянии движения, является применение возможностей оптоэлектроники. В зависимости от типа системы, коррелятор может быть оптикоэлектронный (когерентный или некогерентный), цифровой (спецпроцессор) или гибридный – сочетающий цифровые и оптические методы. Основной функцией данного устройства является вычисление корреляционной функции входных данных с эталонным объектом. Довольно привлекательным и популярным вариантом выбора эталона является применение составного инвариантного корреляционного фильтра [1].

В данной работе в качестве объекта исследования использовались инвариантные корреляционные фильтры (КФ) следующих типов: МСЭК (с минимальной средней энергией корреляции), MINACE (с минимальной средней энергией корреляции и шумоподавлением), DCCF (корреляционный фильтр с контролем межклассового расстояния), полиномиальные фильтры. Были проведены эксперименты по компьютерному моделированию распознавания изображений,

подвергнутых геометрическим преобразованиям поворота и изменению масштаба, а также межклассовому распознаванию изображений.

1. DCCF-фильтр

$$J(h) = \frac{A(h)}{B(h)}, A(h) = h^+ S_A h, B(h) = h^+ S_B h$$

$$S_A = \frac{1}{d} \sum_{c=1}^C (\bar{x}_c - \bar{x}) * (\bar{x}_c - \bar{x})^+$$

$$S_B = \frac{1}{d} \sum_{c=1}^C \sum_{i=1}^N (X_{ic} - \bar{X}_c) * (X_{ic} - \bar{X}_c)^+,$$

$X_c$  - изображение соответствующего класса,

$C$  - число классов,

$X_{ic}$  - диагональная матрица, состоит из 2D преобразований Фурье изображения с номером  $i$  класса  $C$

$d$  - варьируемый параметр

2. Полиномиальные фильтры

$$H = S^{-1} * X$$

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1p} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ S_{p1} & \cdots & S_{pp} \end{bmatrix},$$

$$S_{pq} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i^p - \bar{X}^p) * (X_i^q - \bar{X}^q)^*,$$

$p$  и  $q$  - соответствующие степени

Результаты моделирования позволяют надеяться на успешное применение составных фильтров 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.

**В.И. БУСУРИН, В.А. КНЯЗЬ, К.А. КОРОБКОВ**

*Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)*

## **МЕТОД ОБРАБОТКИ СОВМЕЩЕННОЙ «ГРУБО-ТОЧНОЙ» ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ РАСПОЗНАВАНИЯ ЖЕСТОВ**

Предложен метод обработки совмещенной «грубо-точной» информации, позволяющий увеличить быстродействие систем компьютерного зрения, работающих с распознаванием жестов. Суть этого метода заключается в обнаружении источника жестов (оператора) при помощи совместного использования сенсоров различной природы в параллельных каналах связи с вычислителем: «быстром» – для передачи информации о грубых признаках и «медленном» – для уточнения признаков захваченного объекта.

**V.I. BUSURIN, V.A. KNYAZ, K.A. KOROBKOV**

*Moscow Aviation Institute (National Research University)*

## **METHOD OF PROCESSING COMBINED «ROUGH-PRECISE» INFORMATION IN GESTURES RECOGNITION SYSTEM**

A method of processing combined «rough-precise» information, which allows to increase the speed of the computer system, which work this recognition of gestures, is provided in the report. The essence of this method of detection of source of gestures (operator) is in the sharing of sensors of different nature in the parallel channels of communication with the processor, «fast» - to convey information about signs of rough and «slow» - to clarify the features of the captured object.

В рамках реализации метода обработки совмещенной «грубо-точной» информации для каждой задачи предполагается формирование ряда грубых признаков. Основываясь на грубых признаках, выделяются объекты, интересные для исследования. Таковыми признаками могут являться: яркость объекта, его тепловое излучение или дальность до объекта. Информация о наличии грубых признаков обновляется чаще и передаётся быстрее, чем информация о точных признаках.

Таким образом, нет необходимости тратить дополнительную вычислительную мощность на передачу и обработку «ложной» информации, которая даже не удовлетворяет критериям «грубого» поиска.

Предложено два алгоритма, реализующие данный метод на различных комбинациях датчиков. Первый алгоритм предполагает совместную работу телевизионных (ТВ) и тепловизионных датчиков, а второй – телевизионных и дальномерных датчиков.

При работе первого алгоритма начальный поиск оператора, осуществляется при помощи тепловизионных датчиков. Увеличение производительности достигается за счёт уменьшения количества циклов обработки информации, принятой от ложных источников.

Во втором случае начальный поиск источника жестов осуществляется при помощи ТВ-датчиков, однако после обнаружения источника жестов осуществляется проверка его удалённости. Эта проверка позволяет избежать принятия сигналов, поступающих из областей за границами анализируемого «пятна».

Для анализа производительности алгоритмов произведено сравнение алгоритма прямого распознавания жестов, с алгоритмами обработки совмещённой «грубо-точной» информации. На основе этого составлены гистограммы распределения вычислительных ресурсов в рамках выполнения данных процедур.

Показано, что при совмещённой обработке «грубо-точной» информации требуется меньше времени на предварительную обработку данных и на передачу данных «грубой» информации, за счёт отсутствия потребности в высоком качестве изображений с тепловизоров, датчиков глубины и «грубых» ТВ-датчиков, в отличие от «точных» телевизионных датчиков. Не требуется большого количества итераций, как в алгоритме обработки видеоряда и распознавания жестов точными ТВ-датчиками, так как после грубой обработки данные, получаемые от источника жестов, будут более информативными.

Данные алгоритмы позволят улучшить характеристики предложенной ранее системы поддержки принятия решения пилотом при движении на аэродроме, основанной на технологии компьютерного зрения [1] и предназначенной для снижения количества аварийных ситуаций во время движения по аэродрому. Результаты моделирования показали, что разработанный алгоритм способен распознавать 16 различных жестов и обрабатывать видеoinформацию со скоростью 10 кадров в секунду, из чего следует, что функционирование и обработка принятой информации приближены к масштабу реального времени.

#### *Список литературы*

1. Князь В.В., Бусурин В.И. Автоматическое обнаружение препятствий на взлётно-посадочной полосе средствами технического зрения. // Труды МАИ. 2015. №81. С.1-18.

**В.М. КОТОВ, Г.Н. ШКЕРДИН, С.В. АВЕРИН**  
*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН*

## **ВЫДЕЛЕНИЕ КОНТУРА ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКУСТООПТИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ ИЗ ГИРОТРОПНОГО МАТЕРИАЛА**

Исследован процесс формирования двумерного контура оптического изображения в процессе его «быстрой» Фурье обработки, когда в качестве фильтра пространственных частот используется акустооптическая (АО) ячейка из гиротропного материала. Основной упор сделан на исследовании режима, близкого к режиму трехкратной брэгговской дифракции. Основные теоретические выводы проверены экспериментально на основе Фурье обработки оптических изображений с использованием многократной дифракции в монокристалле  $\text{TeO}_2$ .

**V.M. KOTOV, G.N. SHKERDIN, S.V. AVERIN**  
*Fryazino branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS*

## **OPTICAL IMAGE EDGE ENHANCEMENT WITH THE USING OF THE ACOUSTO-OPTIC FILTERS FROM THE GYROTROPIC MATERIAL**

It is investigated the forming of two-dimensional contour of the optical image during the fast Fourier transformation (FFT) when the acousto-optic (AO) cell from the gyrotropic material as the spatial frequency filter is used. It is emphasized the investigation of the regime close to the three-phonon Bragg diffraction. The principal theoretical results are confirmed experimentally on the basis of the Fourier transformation of the images and with the using of the multi-phonon diffraction in the mono crystal  $\text{TeO}_2$ .

Одним из важных направлений обработки оптических изображений является выделение его контура. Это позволяет существенно уменьшить массивы обрабатываемой информации, но в то же время сохранить такие важные характеристики для распознавания объекта, как его форму, размеры, характер движения и т.п. Наиболее простой способ выделения контура – его Фурье-обработка с использованием пространственных фильтров с заданными характеристиками. Акустооптические (АО) ячейки, используемые в качестве подобных фильтров, позволяют эффективно решать такую задачу. В работах [1-5] описаны варианты использования АО фильтров, позволяющие получать двумерный контур изображения. В

предполагаемом докладе будет описан класс сложных АО фильтров, когда в одной и той же АО ячейке формируется сразу несколько независимых фильтрующих структур (две «маски»). Будут изложены теоретические модели АО взаимодействия, приведены расчеты передаточных функций, представлены их характеристики, описаны функциональные возможности функций, приведены результаты эксперимента. На рис. 1 представлено экспериментально полученный результат формирования двумерного контура в нулевом брэгговском порядке в режиме, близком к режиму трехкратной брэгговской дифракции. Отметим, что в «обычном» режиме дифракции, когда формируется только одна фильтрующая маска, двумерный контур получить невозможно.



Рис. 1. Выделение контура изображения в виде прямоугольника в процессе его Фурье-обработки. Справа – контур изображения в нулевом брэгговском порядке, слева – вид изображения в первом порядке

#### *Список литературы*

1. Котов В.М., Аверин С.В., Шкердин Г.Н., Воронко А.И. Выделение двумерного контура изображения при двукратной брэгговской дифракции. // Квантовая электроника. 2010. Т.40. №4. С.368-370.
2. Котов В.М., Шкердин Г.Н., Булюк А.Н. К вопросу о выделении двумерного контура изображения в результате двукратной брэгговской дифракции. // Квантовая электроника. 2011. Т.41. №12. С.1109.
3. Котов В.М., Шкердин Г.Н., Аверин С.В. Выделение двумерного контура изображения с использованием дифракции во второй брэгговский порядок. // Радиотехника. 2012. №12. С.57.
4. Котов В.М., Шкердин Г.Н., Григорьевский В.И. Поляризационные особенности двумерного оконтуривания изображения в режиме двукратной брэгговской дифракции. // Радиотехника и электроника. 2013. Т.58, №3. С.226-232.
5. Котов В.М., Шкердин Г.Н., Аверин С.В. Формирование двумерного контура изображения в двух дифракционных порядках в процессе трехкратной брэгговской дифракции. // Радиотехника и электроника. 2016. Т.61, №11. С.1090-1094.

Н.М. ВЕРЕНИКИНА, М.С. КОВАЛЕВ,  
Е.С. КОЛОСОВА, П.И. МАЛИНИНА

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

## **МЕТОДИКА КОРРЕКЦИИ ФАЗОВЫХ ИСКАЖЕНИЙ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Проведены математическое моделирование, исследование и анализ фазовых искажений, возникающих при прохождении волнового фронта через компоненты оптической системы стенда проекционной записи микроголограмм Фурье при наличии ошибок изготовления и сборки. Разработана методика коррекции выявленных искажений на основе дифракционных оптических элементов по базису ортогональных круговых полиномов Цернике.

N.M. VERENIKINA, M.S. KOVALEV,  
E.S. KOLOSOVA, P.I. MALININA  
*Bauman Moscow State Technical University*

## **METHODS OF CORRECTION PHASE DISTORTION BASED ON DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS**

Mathematical modeling, research and analysis phase distortions that occur during the passage of the wave front of the components of the optical system of the projection booth recording microholograms Fourier in the presence of manufacturing and assembly errors. The method of correction of distortion based on diffractive optical elements on the basis of orthogonal circular Zernike polynomials.

Использование компьютерного синтеза голографических структур значительно упрощает оптическую схему, которая применяется для записи микроголограмм в голографической системе памяти [1], в связи с этим к таким системам предъявляются высокие требования по сборке и юстировке. Поэтому целью данной работы было исследовать и разработать научно-обоснованный метод анализа фазовых искажений по измеренным волновым aberrациям реальной оптической системы проекционной записи микроголограмм Фурье.

Измерения волнового фронта важны во многих сферах прикладной оптики, таких как: контроль волнового фронта (ВФ) лазерных пучков, контроль и управление состоянием оптических систем при передаче и приеме информации через турбулентные среды и т.д. Такие измерения

необходимо осуществлять в реальном времени с высокими точностью и пространственным разрешением. Кроме того, желательно, чтобы прибор для измерения ВФ мог использовать световые пучки с низкой временной когерентностью и обеспечивать высокую скорость восстановления измеренного ВФ.

Наиболее совершенной модификацией таких приборов является модовый датчик волнового фронта с парами мод-амплитудных голограмм [2, 3], где используется только пара амплитудных вариаций в широком диапазоне значений для каждой аберрации.

Для стенда проекционной записи микроголограмм Фурье были измерены карты фазовых искажений, которые содержали большое количество низкочастотных шумов, а так же высокочастотных искажений. Затем фазовые карты были аппроксимированы полиномами Цернике, что обеспечивает компенсацию основных низкочастотных ошибок, при этом обеспечивая широкий диапазон допусков на юстировку компонентов оптической схемы. Для последующей коррекции волнового фронта фазовая функция была закодирована в полутоновом шаблоне и изготовлена по технологии, описанной в [4].

#### *Список литературы*

1. Бетин А.Ю., Бобринев В.И., Вереникина Н.М., Донченко С.С., Евтихийев Н.Н., Злоказов Е.Ю., Одинокоев С.Б., Стариков С.Н., Стариков Р.С. Метод проекционной мультиплексной записи компьютерно-синтезированных одномерных голограмм Фурье для систем голографической памяти: математическое и экспериментальное моделирование. // Квантовая электроника. 2015. Т.45. №8. С.771-775.
2. Neil M.A.A., Booth M.J., Wilson T. New modal wave-front sensor: a theoretical analysis. // J. Opt. Soc. Am. A. 2000. V.17. P.1098-1107.
3. Kovalev M.S., et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V.737. P.012064.
4. Полещук А.Г. Изготовление высокоэффективных элементов дифракционной оптики с помощью полутоновой и фоторастровой технологий. //Автометрия. 1991. №6.



**В.В. КРАСНОВ, Е.Д. МИНАЕВА**

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПРЯМОГО ПОИСКА  
СО СЛУЧАЙНОЙ ТРАЕКТОРИЕЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ  
ОШИБКИ СИНТЕЗА ФАЗОВЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ  
ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Проведен анализ эффективности применения метода прямого поиска со случайной траекторией для снижения ошибки синтеза фазовых дифракционных оптических элементов – киноформов. Продемонстрировано снижение ошибки синтеза до 36%.

**V.V. KRASNOV, E.D. MINAEVA**

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

**APPLICATION OF DIRECT SEARCH WITH RANDOM  
TRAJECTORY METHOD FOR REDUCTION OF PHASE  
DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS SYNTHESIS ERROR**

Analysis of efficiency of application of direct search with random trajectory method for reduction of phase diffractive optical elements synthesis error is performed. Reduction of synthesis error up to 36% is demonstrated.

Подход, используемый в методе прямого поиска со случайной траекторией (ППСТ) [1], схож с подходом, реализованным в методе прямого бинарного поиска [2], разработанном для синтеза бинарных голограмм. В отличие от метода прямого бинарного поиска, предложенный метод предназначен для работы с многоградационными как амплитудными, так и фазовыми дифракционными оптическими элементами (ДОЭ).

Для снижения ошибки синтеза фазовых дифракционных оптических элементов – киноформов, метод ППСТ был применен следующим образом. Вначале киноформ генерируется стандартным методом Герчберга-Сэкстона [3], затем создается случайная карта обхода матрицы значений киноформа. Далее, в соответствии с картой обхода, значения элементов киноформа поочередно изменяются таким образом, чтобы минимизировать отклонение реконструированного изображения от исходного.

Было установлено, что эффективность метода снижается с ростом числа градаций фазы киноформа (см. рис. 1), так, наибольшее снижение наблюдается при 4 градациях фазы и составляет 36%.

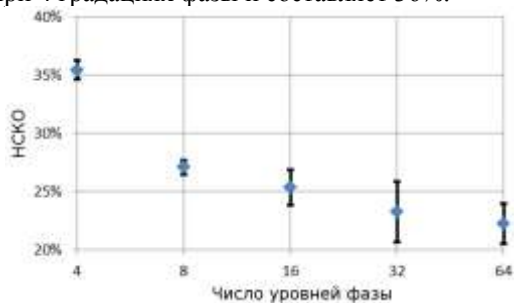


Рис. 1. Зависимость величины снижения ошибки синтеза от числа градаций фазы киноформов

Пример реконструированного изображения в случаях стандартного и улучшенного киноформа приведен на рис. 2. Киноформы имеют  $256 \times 256$  отсчетов и 4 градации фазы. Значения нормированного среднеквадратического отклонения составляют 0,48 и 0,31 соответственно.

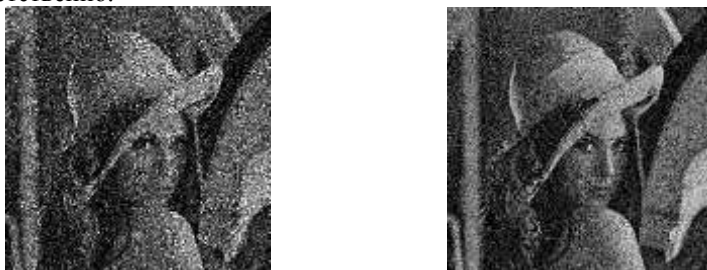


Рис. 2. Пример реконструированного изображения в случаях стандартного (слева) и улучшенного (справа) киноформа

Результаты экспериментов демонстрируют существенное снижение ошибки синтеза предложенным методом.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-37-00343.

#### *Список литературы*

1. Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Starikov S.N. // J. Opt. Technol. 2013. V.80. P.294.
2. Seldowitz M.A., Allebach J.P., Sweeney D.W. // Applied optics. 1987. V.26. P.2788.
3. Gerchberg R.W., Saxton W.O. // Optik. 1972. V.35. P.237.

И.А. АРТЮКОВ, Н.Н. ИРТУГАНОВ

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

**НЕЛИНЕЙНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ШУМОВ  
С АВТОПОДБОРОМ ПАРАМЕТРОВ  
ПРИ МИКРОТОМОГРАФИЧЕСКОМ ИССЛЕДОВАНИИ  
МАЛОКОНТРАСТНЫХ ОБЪЕКТОВ**

В работе проводится исследование применимости метода Перона-Малика (метод анизотропной диффузии) с автоподбором параметров для рентгеновской томографии на примере бериллиевой мишени для ЛТС.

I.A. ARTYUKOV, N.N. IRTUGANOV

*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

**THE NON-LINEAR NOISE REDUCTION  
WITH AUTO-FIT PARAMETERS IN MICROTOMOGRAPHY  
STUDIES OF LOW-CONTRAST OBJECTS**

This work deals with an application of the Perona-Malik algorithm with auto-fit parameters in X-ray microtomography of low contrast objects, such as beryllium microsphere targets for ICF experiments.

Шумоподавление при микромографическом исследовании малококонтрастных объектов является необходимой процедурой для визуализации и анализа результатов. Одним из эффективных методов фильтрации шумов является нелинейный фильтр Перона-Малика (метод анизотропной диффузии). В данной работе этот метод был реализован в компьютерной программе, написанной с учётом особенностей рентгеновского сканирования на микромографе типа SKYSCAN (Бельгия). В программе выбор параметров фильтрации, в т.ч. коэффициента контраста, осуществлялся автоматически на основе модификации подхода, предложенного в работе [1]. Этот подход основывается на объединении двух методов: метод кластеризации К-средних и метод наименьших квадратов (МНК). Число итераций определяется величиной дисперсии фоновой области изображения, не содержащей объекта.

В качестве объекта была выбрана упрощённая модель мишени для лазерного термоядерного синтеза (ЛТС), состоящая из сферической оболочки, изготовленной из бериллия толщиной 1000 микрон и DT-смеси (3). Расчёты показали, что поглощение рентгеновского излучения стенкой сферы составляет всего около 1%, что сильно затрудняет получение качественного изображения на фоне характерного дробового шума (5%).



Рис. 1. Модель рентгеновского контраста стенки бериллиевой мишени в виде полосы интенсивностью 1% и наложенным на неё 5% Гауссовым шумом (слева) и результат обработки изображения после фильтрации шумов, динамический диапазон изменён для лучшей визуализации

Эффективность разработанного метода была подтверждена видимым улучшением качества изображений (рис. 1), а также увеличением отношения сигнал-шум (SNR, PSNR) и подобия SSIM обработанного и идеального изображений (2).

#### *Список литературы*

1. Mecias A.L. New estimation method of the contrast parameter for the Perona-Malik diffusion equation. 2014.
2. Hore A., Ziou D. Image quality metrics: PSNR vs SSIM. // Conference: 20th International Conference on Pattern Recognition, ICPR 2010. Istanbul, Turkey, 2010.
3. Меркульев Ю.А., Акунец А.А., Борисенко Н.Г., Воронцов А.С., Горлевский В.В., Громов А.И., Дороготовцев В.М., Забродин А.В., Маркушин Ю.Е., Пименов В.Г., Свицин Р.А., Страшина В.Г., Стороженко П.А., Халенков А.М., Чирин Н.А. Новые технологии в инертном термоядерном синтезе.

Н.Н. ЕВТИХИЕВ, Р.С. СТАРИКОВ, П.А. ЧЕРЁМХИН  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **МЕТОДИКА ОПЕРАТИВНОГО И ТОЧНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ ШУМОВ ФОТО- И ВИДЕОКАМЕР**

Разработана методика оперативного получения временных шумов по результатам съемки 2 кадров, не уступающая по точности измерений классическому методу. Оценена точность метода, а также время расчетов.

N.N. EVTIKHIEV, R.S. STARIKOV, P.A. CHEREMKHIN  
*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)*

## **ACCURATE AND RAPID METHOD OF MEASUREMENT OF TEMPORAL NOISE OF PHOTO- AND VIDEOCAMERAS**

A method of fast temporal noise measurement (as a result of 2 frames shooting) is proposed. The method accuracy corresponds to the standard one. Estimates of execution time are obtained.

В настоящее время существуют различные типы оптико-цифровых систем, требующих точного знания шумов используемых камер: работающие на принципах кодирования волнового фронта, цифровой голографии и др. Однако производители даже научных камер часто не предоставляют многие характеристики. Таким образом, нужен метод быстрого, точного, но достаточно простого измерения шумов камер.

Методы измерения характеристик фото- и видеокамер приведены, например, в стандарте EMVA 1288: временной шум определяется из множества снимков (не менее 100) многочисленных сцен с однородным освещением. Существуют методы для оценки шума при помощи одного снимка (например, [1]), однако не предназначенные для количественной оценки. Чтобы преодолеть эти недостатки, А. Foі и др. [2] измерили временной шум путём съемки десятков кадров одной сцены и автоматической сегментации неоднородной мишени (АСНМ). Мы модифицировали метод АСНМ [3]. В результате 1) получена несмещённая оценка временного шума 2) с использованием всего 2 кадров; 3) увеличена скорость расчетов; 4) измерены темновые и световые временные шумы отдельно.

С помощью разработанного метода световые и темновые временные шумы 4 камер разных типов (Canon, MegaPlus, PixeLink, Watec) были

измерены. Погрешности измерения шумов аналитически оценены [3] и проверены экспериментально. Различие составило всего 0,4% (рис. 1).

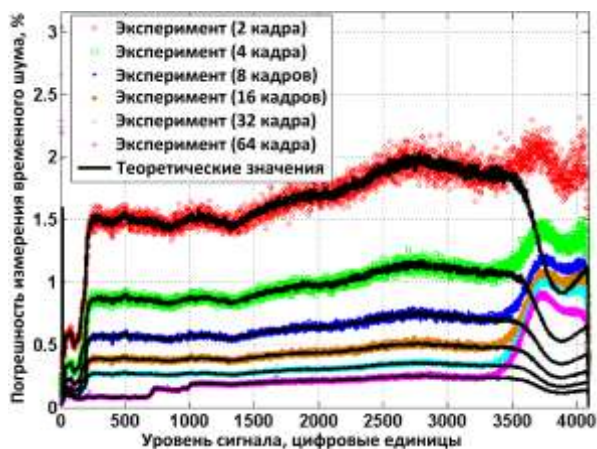


Рис. 1. Экспериментальные и теоретические зависимости погрешности измерения временного шума от уровня регистрируемого сигнала (для камеры MegaPlus)

Погрешность измерения временного шума, используя только 2 кадра, равна 1,6%, что соответствует EMVA 1288. Использование же 64 кадров снижает погрешность до 0,2 %, что в 10 раз меньше, чем по стандарту.

Также измерено время обработки кадров предложенным методом. Так, для камеры Watec LCL-902C обработка 8 кадров равна всего 0,5 с [4].

Таким образом, разработанная методика позволяет быстрое (в 50 раз и более), удобное (съёмка всего 2 кадров) и точное (не меньше точности стандартов) измерение временного шума фото- и видеокамер.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного (РНФ), грант № 14-19-01751.

#### *Список литературы*

1. Liu C., et al. Automatic estimation and removal of noise from a single image. // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2008. V.30 (2). P.299-314.
2. Foi A., et al. Noise measurement for raw-data of digital imaging sensors by automatic segmentation of non-uniform targets // IEEE Sensors Journal. 2007. V.7 (10). P.1456-1461.
3. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Starikov S.N., et al. Modified temporal noise measurement method with automatic segmentation of non-uniform target, its accuracy estimation and application to cameras of different types // Optical Engineering. 2014. V.53 (10). P.102107.
4. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., et al. Fast measurement of temporal noise of digital camera's photosensors // Proceedings of SPIE. 2015. V.9648. P.96480R.

**В.В. КАПРАНОВ, И.С. МАЦАК, В.Ю. ТУГАЕНКО, А.В. БЛАНК<sup>1</sup>**

*Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королева, Королев*

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

## **ДВУХКАМЕРНАЯ СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ СО СПЕКТРАЛЬНЫМ УДАЛЕНИЕМ ШУМА**

Представлено описание и устройство двухкамерной системы с лазерной подсветкой на длине волны 532 нм и спектральным удалением шума. Основными элементами разработанного прототипа системы являются две камеры с полосовыми оптическими фильтрами и светоделительный куб. Световой поток разделяется на две равные части светоделителем, которые через различные полосовые фильтры попадают на камеры. Вычитание кадра одной камеры из кадра другой позволяет удалить большую часть внешнего света. Работа системы проверена в сложных условиях, результаты представлены.

**V.V. KAPRANOV, I.S. MATSAK, V.Yu. TUGAENKO, A.V. BLANK<sup>1</sup>**

*S.P Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Korolev*

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

## **BACKGROUND REDUCTION LASER ILLUMINATION IMAGING BASED ON DUAL-BAND CAMERA-SYSTEM**

The design and setup of a dual-band camera system for 532 nm laser illumination was reported in this paper. The prototype system developed in this research was two visible-band images simultaneously. This was accomplished by using a beam-splitter, two identical monochrome cameras and bandpass filters. The light (environment and laser reflected) was split identically into two directions by beamsplitter. Focusing lenses then projected each image onto its camera. One image contains the laser reflected light, another – only environment light. Subtraction second image from the first eliminates the most of background light due to smooth spectrum of common light sources and leaves easily-thresholded image. The prototype imaging system was tested in some outdoor applications, these results are presented.

Большинство современных систем наблюдения предназначены для работы в идеальных условиях. Эксплуатация обычных систем технического зрения с лазерной подсветкой в сложных погодных условиях чаще всего невозможна или затруднена. Искусственные источники света и солнце создают основные помехи, полностью избавиться от которых нельзя. Самый простой способ борьбы с такими помехами –

использование мощного лазерного источника для подсветки. Мы же изучаем другой способ – спектральное удаление помех из кадра [1, 2].

В этой статье представлено описание и устройство двухкамерной системы с лазерной подсветкой на длине волны 532 нм (рис. 1 и 2). Разработанный прототип системы получает два кадра в различных спектральных каналах одновременно (532 и 550 нм) благодаря использованию делителя пучка, двух одинаковых черно-белых камер и полосовых оптических фильтров. Световой поток разделяется на две части делителем пучка, которые через различные полосовые фильтры попадают на камеры. Один поток содержит отраженное лазерное излучение и внешний свет, другой – только внешний свет (помехи). Вычитание второго потока из первого позволяет удалить большую часть внешнего света из кадра (рис. 3).



Рис. 1. Фотография прототипа



Рис. 2. Схема системы



Рис. 3. Лазерная подсветка объекта с отражателем на фоне заката (слева - полосовой фильтр 532 нм, справа - предложенный прототип системы)

#### *Список литературы*

1. Watanabe K., et al. // Video Synthesis with High Spatio-temporal Resolution Using Spectral Fusion. // Proc. of MRCS. 2006. P.683-690.
2. Sun D-W., et. al. // Computer vision technology in the food and beverage industries. 2012. P.528.



И.С. МОЩЕВ<sup>1,2</sup>, П.А. КУЗНЕЦОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

<sup>2</sup>АО «НПО «Орион», Москва

## **ФОТОМОДУЛЬ 320x256 НА ОСНОВЕ InGaAs/InP ДЛЯ АКТИВНО-ИМПУЛЬСНЫХ ФОРМИРОВАТЕЛЕЙ ИЗОБРАЖЕНИЯ**

В АО «НПО «Орион» создано матричное фотоприёмное устройство с расширенным функционалом. Помимо получения тепловизионного изображения оно позволяет вести работу в дальномерном режиме, а так же в режиме приема асинхронных импульсов. Разработанный ФМ не имеет аналогов в России и имеет хорошие перспективы применения с матрицами лавинных фотодиодов.

I.S. MOSHCHEV<sup>1,2</sup>, P.A. KUZNETSOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research University "MPEI" (Moscow Power Engineering Institute)

<sup>2</sup>Orion R&P Association, Moscow

## **320x256 InGaAs/InP PHOTOMODULE FOR ACTIVE IMAGERS**

Advanced electro-optical systems are designed towards a more compact, low power, and low cost solution with respect to traditional systems. Integration of several components or functionalities, such as thermal imager, laser designator, laser range finder, into one multi-function detector should serve this need and trend. It is a new type of infrared detector, which consists of a Read-Out Integrated Circuit that incorporates high level of signal processing. ROIC can be operated in three different modes of operation: standard thermal imaging, two dimensional laser range finder in which the detector is synchronized to a laser and asynchronous laser pulse detection combined with thermal imaging. ROIC is also suitable for avalanche photo diodes.

Разработанный фотомодуль (ФМ) имеет формат матрицы входных ячеек – 320x256 с шагом 30мкм. ФМ предназначен для применения в составе активных формирователей 3D изображения по отраженным лазерным импульсам малой длительности (десятки наносекунд) и длиной волны 1.54 мкм или 1.06 мкм. В качестве датчиков сигнала обычно используются матрицы р-і-п фотодиодов или фотодиодов с лавинным умножением на основе InGaAs/InP. Основной особенностью ФМ является введение во все входные ячейки функции измерения дальности до произвольной точки исследуемого объекта. При этом сохраняется функция формирования обычного 2D изображения по сигналам яркости. Основу ФМ составляет кремниевая БИС считывания. В БИС считывания

имеется оконный режим просмотра изображения и переключение количества информационных выходов (8 или 1). Потребляемый ток—50мА при напряжении питания— 3.3В. Пороговый сигнал в дальномерном режиме порядка 250 электронов при длительности импульса— 50нс (на обычной  $\text{pin}$  матрице без умножения).

Ближайшим аналогом является ФПУ фирмы SCD формата 640x512 (шаг 15 мкм) для ближнего ИК-диапазона с двумя дополнительными функциями: измерение дальности и асинхронный режим для обнаружения посторонних источников лазерного излучения.

На основе разработанного ФМ была проведена визуализация изображений в ближнем ИК спектре (0.9-1.7 мкм) в различных режимах работы БИС считывания при комнатной температуре ФМ и без компьютерной обработки дефектов.



Рис. 1. Обычное изображение: горячий паяльник и пятно от лазерных импульсов  $\lambda = 1.54$  мкм с выхода оптоволокну,  $t_{\text{и}} = 50$  нс

На рис. 1 показано в обычном 2D режиме яркостное изображение горячего паяльника и пятна от лазерных импульсов на выходе оптоволокну с  $\lambda = 1.54$  мкм,  $t_{\text{и}} = 50$  нс. В этом режиме невозможно различить источники импульсного и непрерывного излучения, так как обработка фотосигнала происходит только в секции накопления входной ячейки.

#### *Список литературы*

- 1 Gohler B., Lutzman P. // Proceedings of SPIE. 2015. V.9649. doi:10.1117/12.2195932.
2. Langof L., Nussinson D., Pan E., Elkind S., et al. // Proceedings of SPIE. 2011. V.8012. P.80120F.
3. Кузнецов П.А., Мошев И.С. // Успехи прикладной физики. 2014. №2. С.163.

А.Л. ТОЛСТИК

*Белорусский государственный университет, Минск*

## **ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ ГОЛОГРАФИЯ**

Проанализированы схемы поляризационной записи динамических голограмм, реализуемой при ортогональной поляризации взаимодействующих волн. Особое внимание уделено сингулярным поляризационным голограммам, формируемым гауссовыми и сингулярными световыми пучками. Продемонстрирована возможность управления поляризацией сингулярной волны за счет изменения поляризации волн, участвующих во взаимодействии.

A.L. TOLSTIK

*Belarusian State University, Minsk*

## **POLARIZATION DYNAMIC HOLOGRAPHY**

The schemes of the dynamic-hologram polarization recording realized on orthogonal polarization of the interacting waves are analyzed. The main attention is focused at the singular polarization holograms formed by Gaussian and singular light beams. The possibilities to control polarization of a singular wave by changes in polarizations of the waves involved in the interaction are demonstrated.

Среди голографических методов преобразования изображений и управления световыми пучками можно выделить методы, основанные на поляризационной записи динамических голограмм, реализуемой при ортогональной поляризации записывающих голограмму волн, когда суммарная интенсивность остается постоянной и имеет место только пространственная модуляция поляризации света в соответствии с разностью фаз записывающих голограмму волн [1].

В настоящей работе приведен обзор результатов по поляризационной записи динамических голограмм, формируемых в схемах четырех- и шестиволнового смещения, включая запись голограмм гауссовыми и сингулярными световыми пучками. Проанализированы состояния поляризации дифрагированной волны в зависимости от комбинации состояний поляризации всех волн, участвующих во взаимодействии.

Классические схемы записи поляризационных динамических голограмм реализуются в резонансных средах со светоиндуцированной анизотропией поглощения [2, 3]. В такой ситуации в объеме среды формируется пространственно модулированная анизотропия показателя

преломления, дифракция на которой зависит от поляризации восстанавливающей волны. При восстановлении поляризационной динамической голограммы линейно поляризованной волной в четных порядках дифракции поляризации дифрагированной и считывающей волн совпадают, а в нечетных порядках дифракции поляризации волн ортогональны. При использовании считывающей волны с круговой поляризацией поляризация дифрагированной волны будет являться круговой, но направление вращения поменяется на противоположное.

Более сложная ситуация имеет место, когда голограмма записывается волнами с ортогональными круговыми поляризациями. При восстановлении такой голограммы волной как с линейной, так и с круговой поляризацией поляризация дифрагированной волны является круговой и при дифракции в первый порядок совпадает с поляризацией сигнальной волны.

При использовании для записи динамических голограмм одной волны с линейной, а второй с круговой поляризацией в среде формируется смешанная решетка за счет пространственной модуляции как интенсивности, так и состояния поляризации интерференционного поля. При этом поляризация дифрагированной волны будет эллиптической, вытянутой вдоль направления поляризации считывающей волны.

Переход к сингулярным поляризационным голограммам реализуется при использовании сингулярного пучка, имеющего винтовую фазовую дислокацию [4]. Показано, что при дифракции на такой голограмме при любой комбинации поляризаций взаимодействующих волн топологический заряд, внесенный в сформированную динамическую голограмму, передается дифрагированной волне и по модулю равен заряду сигнальной волны. Продемонстрирована возможность управления поляризацией сингулярной волны (изменения от линейной до круговой) за счет изменения поляризации волн, участвующих во взаимодействии.

#### *Список литературы*

1. Какичашвили Ш.Д. О поляризационной записи голограмм. // Оптика и спектроскопия. 1972. Т.33. №2. С.324-327.
2. Ормачеа О., Толстик А.Л. Поляризационное многоволновое взаимодействие в растворах лазерных красителей. // Известия РАН. Сер. Физическая. 2005. Т.69. №8. С.1144–1146.
3. Cheng X., Du Y., Zhang Y., Wang Z., Miao Y., Ren Z., Bai J. Polarization of four-wave mixing with electromagnetically induced transparency. // Optics Communications. 2012. V.285. N.21-22. P.4507-4514.
4. Толстик А.Л. Сингулярная динамическая голография. // Известия вузов. Физика. 2015. Т.58. №10. С.65–74.

А.В. МОРОЗОВ<sup>1</sup>, А.Н. ПУТИЛИН, С.Е. ДУБЫНИН<sup>1</sup>,  
С.С. КОПЕНКИН<sup>2</sup>, Ю.П. БОРОДИН<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>*Исследовательский центр Самсунг, Москва*

<sup>3</sup>*Московский технологический университет (МИРЭА)*

## **КОГЕРЕНТНЫЕ ОСВЕТИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ДИСПЛЕЕВ**

Рассматриваются особенности применения волноводных и голограмм на полном внутреннем отражении (ПВО) для формирования коллимированных когерентных лазерных пучков большого поперечного сечения – до нескольких кв.дм. Основной областью применения таких осветителей являются системы отображения Real 3D и голографической информации. Экспериментально продемонстрирована работа полноцветного осветителя с толщиной 0.7 мм.

A.V. MOROZOV, A.N. PUTILIN, S.E. DUBYNIN<sup>1</sup>,  
S.S. KOPENKIN<sup>2</sup>, Yu.P. BORODIN<sup>2</sup>

*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

<sup>1</sup>*Samsung Research Center, Moscow*

<sup>2</sup>*Moscow Technological University (MIREA)*

## **COHERENT BACKLIGHT UNITS FOR HOLOGRAPHIC DISPLAY**

This article describes illumination devices for holographic display using coherent radiation from laser source. These backlighting systems are providing uniform and highly collimated illumination. Coherent RGB backlight units (BLU) with several square decimeter size and 0.7 mm thickness was experimentally demonstrated.

В данной статье рассматривается устройство когерентного освещения для голографического дисплея, использующего лазерные источники. Эти системы подсветки обеспечивают равномерное и эффективное освещение в устройствах визуализации [1]. Линзовые коллиматоры и расширители пучка довольно громоздки и большинство схем голографического динамического отображения информации остаются далекими от практического применения без разработки плоских интегральных осветительных систем. Нами предлагается тонкий блок когерентной подсветки для мобильного голографического дисплея. Этот модуль задней подсветки состоит из стеклянной подложки - волновода и двух

поверхностных дифракционных решеток, полученных с помощью двухлучевой интерференции. Две решетки используются, в частности, для ахроматизации, поскольку волноводная дифракционная решетка обладает огромной хроматической дисперсией. Красный, зеленый и синий компоненты вводятся в волновод первой дифракционной решеткой и распространяются в нем под разными углами, которые компенсируются на выходной решетке и выходной пучок снова становится белым (рис. 1а).

В экспериментах использовались лазеры с длинами волн 473, 532 и 633 нм. Плоские дифракционные решетки были использованы в качестве вводного и выводного элементов связи [2, 3]. Решетки, отвечающие заданным параметрам, были записаны на фоторезисте марки Shipley S1813 G2, используемого в литографии, при помощи He-Cd лазера с длиной волны 442 нм. Период решеток ограничен несколькими условиями. Так, угол дифракции излучения на входной решетке должен быть больше угла полного внутреннего отражения (ПВО). Угол дифракции имеет наименьшее значение для синего света, таким образом, условие ПВО должно выполняться в первую очередь для длины волны 473 нм (рис. 1б, сплошная линия). Во-вторых, более высокие порядки дифракции должны оставаться в волноводе, что актуально для синего излучения – рис. 1б.

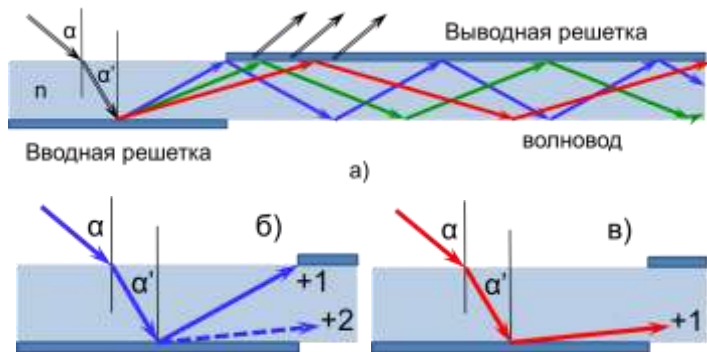


Рис. 1. Принцип действия системы подсветки

На рис. 2 показана схема записи голограмм осветителя. На фоторезисте регистрировалась интерференционная картина двух лучей с s-поляризацией, падающих на регистрирующую среду под углом  $26.2^\circ$  к нормали. Соотношение сигнал-опора варьировалось в диапазоне 1:1~1:50.

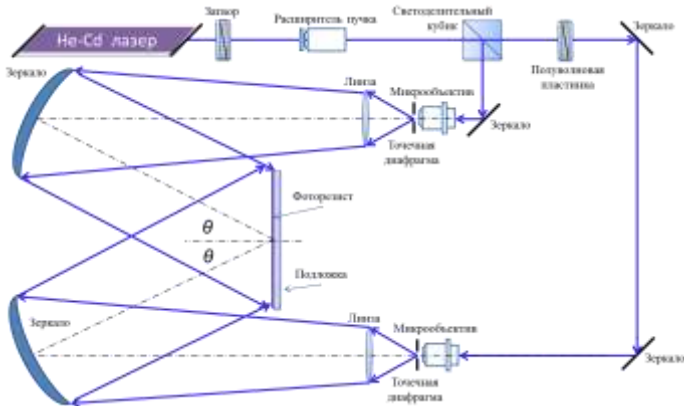


Рис. 2. Оптическая схема записи

Последним этапом получения осветительной системы являлся перенос рельефа решетки с фоторезиста на поверхность волновода. Данная процедура осуществляется с помощью УФ-отверждаемого полимера. В экспериментах была продемонстрирована работа системы подсветки, полностью удовлетворяющая требованиям, предъявляемым к системам подсветки голографических дисплеев, размером 150 на 85мм (для панели диагональю 5.5 дюймов с рабочей областью 126 на 75мм) и толщиной всего 0,7 мм. С помощью данного модуля подсветки было продемонстрировано восстановление статической полноцветной динамической голограммы. Схема получения однородного коллимированного пучка ахроматического когерентного света была запатентована [4, 5].

#### Список литературы

1. Putilin A., Gustomiasov I. Application of holographic elements in displays and planar illuminators. // Proc. SPIE. 2007. V.6637. 66370N.
2. Choi C.-S., Morozov A.V., et al. Ultra-slim coherent backlight unit for mobile holographic display. // Proc. SPIE. 2015. V.9556. 955606.
3. Morozov A.V., et al. Backlight unit for holographic display apparatus and holographic display apparatus including the same. US Patent 20160147003. 2016.
4. Kim S., et al. Backlight unit for holographic display. US Patent 20160033710. 2016.
5. Morozov A.V., et al. Scanning ultra slim coherent backlight unit. RU Patent Application 2014146782. 2014.

И.А. ШЕВКУНОВ, Н.В. ПЕТРОВ, В.Я. КАТКОВНИК<sup>1</sup>

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

*<sup>1</sup>Технологический университет Тампере, Финляндия*

## **МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВНЕОСЕВЫХ ГОЛОГРАММ НА ОСНОВЕ РАЗНОНАПРАВЛЕННЫХ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ОКОН И ПРАВИЛА ПЕРЕСЕКАЮЩИХСЯ ДОВЕРИТЕЛЬНЫХ ИНТЕРВАЛОВ**

Представлен новый метод восстановления волнового фронта из внеосевых голограмм. Данный метод основан на методе наименьших квадратов, но в отличие от традиционного метода, нами предложено использование несимметричных, разнонаправленных окон, различного размера и формы, что приводит к улучшению качества восстановления, по сравнению с традиционным подходом. Для выбора достоверных характеристик окон используется правило пересечения доверительных интервалов.

I.A. SHEVKUNOV, N.V. PETROV, V.Ya. KATKOVNIK<sup>1</sup>

*ITMO University, Saint-Petersburg*

*<sup>1</sup>Tampere University of Technology, Finland*

## **RECONSTRUCTION METHOD FOR OFF-AXIS HOLOGRAMS BASED ON MULTIDIRECTIONAL NONSYMMETRICAL WINDOWS AND INTERSECTION OF CONFIDENCE INTERVALS RULE**

In this paper we introduce an advanced variational algorithm to object wavefront reconstruction from noisy intensity observations for the off-axis holography scenario with imaging in the acquisition plane. That method is based on the local least square algorithm. The main point, which increases the quality and resolution of the reconstructed object wavefronts, is in the use of windows of different sizes, shapes and directions. For the right choice of the best reconstruction the Intersection of the confidence intervals rule is utilized.

Метод наименьших квадратов (МНК) используется для восстановления волнового фронта из внеосевых голограмм [1]. Основным параметром восстановления в данном методе является размер операционного окна.

В работе нами предложен новый подход к задаче восстановления волнового фронта из внеосевых голограмм, который основан на МНК, но с использованием несимметричных окон с различными размерами и



направлениями, а используемое правило пересечения доверительных интервалов (ПДИ) осуществляет выбор оптимального размера окна для заданного направления [2]. Предложенное решение позволило реализовать не только высокое шумоподавление, но и значительно улучшить качество восстановления. Таким образом, разрешение данного метода, именуемого ПДИ – МНК, ограничивается только разрешением используемой оптической системы. За счёт использования разнонаправленных окон различного размера, удаётся восстанавливать мелкие детали волновых фронтов, которые ранее не могли быть разрешены при использовании традиционных симметричных окон.

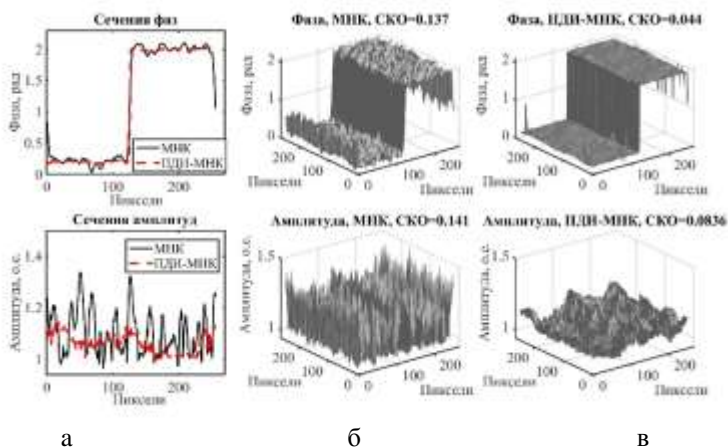


Рис. 1. Результат восстановления объекта: сечения (а), метод МНК (б), предложенный метод (в), верхний ряд – фазы, нижний – амплитуды

На рис. 1 представлены результаты восстановления из шумной голограммы (ОСШ=5) волнового фронта фазовой ступени. Для качественной оценки разработанного метода приведены продольные сечения, на которых явно видно подавление шумов с сохранением четких границ особенностей объекта, в то время как результат традиционного МНК значительно хуже.

Работа выполнена при поддержке Министерство образования и науки Российской Федерации, проект №2014/190, и Академии Наук Финляндии, проект №287150, 2015-2019.

#### Список литературы

1. Liebling M., et.al. // J. Opt. Soc. Am. 2004. V.21(3). P.367.
2. Katkovnik V., et.al. // J. Math. Imaging Vision. 2002. V.16. P.223–235.

Г.С. КАЛЕНКОВ<sup>1</sup>, С.Г. КАЛЕНКОВ<sup>2</sup>,  
В.А. КИСЕЛЕВ<sup>1,3</sup>, С.В. КЛИМЕНКО<sup>4</sup>

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

<sup>2</sup>*Московский политехнический университет*

<sup>3</sup>*Научно-технический центр "Атлас", Москва*

<sup>4</sup>*Институт физико-технической информатики, Протвино*

## **ВИРТУАЛЬНОЕ ОКРУЖЕНИЕ КАК ТЕХНИКА ВИЗУАЛИЗАЦИИ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ГОЛОГРАММ**

Разработана демонстрационная программа визуализации цифровых голограмм биообъектов в среде виртуального окружения. Выбраны аппаратные составляющие и спроектирован интерфейс. Предложен формат представления данных, а также эффективные методы чтения информации в режиме реального времени.

G.S. KALENKOV<sup>1</sup>, S.G. KALENKOV<sup>2</sup>,  
A.V. KISELEV<sup>1,3</sup>, S.V. KLIMENKO<sup>4</sup>

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

<sup>2</sup>*Moscow Polytechnic University*

<sup>3</sup>*Scientific and Technical Centre «Atlas», Moscow*

<sup>4</sup>*Institute of Physical and Technical Informatics, Protvino*

## **VIRTUAL ENVIRONMENT, LIKE THE TECHNOLOGY OF VISUALIZATION HYPERSPECTRAL HOLOGRAMS**

Visualization of digital holograms by means of virtual environment systems considered. Hardware components are defined and configured. An application demonstrating basic functional is designed, including simple interior with a menu. Amplitude-phase profiles of bioobjects are loaded and visualized in virtual environment.

В серии работ [1-3] был предложен новый способ записи гиперспектральных голограмм биообъектов в некогерентном свете. По сравнению с традиционными методами цифровой голографии, использующей когерентные источники света, гиперспектральная голография обладает существенно большей информационной ёмкостью. Она позволяет в едином акте измерения регистрировать пространственно-спектральные характеристики объекта с высоким отношением сигнала к шуму. Это связано в первую очередь с тем, что гиперспектральная

голография основана на принципах Фурье-спектроскопии и наследует ее сильные стороны.

На дисплее изображение восстановленной цифровой голограммы создает полную иллюзию объемного цветного объекта, который можно вращать и соответственно рассматривать с разных сторон. Тем не менее, при таком представлении объекта на дисплее стерео эффект отсутствует. Аналоговая голограмма в этом отношении производит, несомненно, значительно большее впечатление на наблюдателя: в этом случае наблюдатель видит объемное или стерео изображение. Между тем, в цифровой голограмме, по сути, содержится вся та же информация, что и в аналоговой, именно: и амплитудное, и фазовое распределение записано в виде соответствующих числовых массивов. Поэтому представляется актуальным построить и затем предъявить наблюдателю стерео портрет объекта, полученный как результат соответствующей обработки этих числовых массивов. По нашему мнению такая техника стерео визуализации гиперспектральных голограмм является основой для построения нового класса приборов: цифровых стерео голографических микроскопов, позволяющих пользователю наблюдать и исследовать микрообъект в цвете и объеме.

Аппаратная часть для системы виртуального окружения состоит из очков виртуальной реальности и контроллера человеко-компьютерного взаимодействия для манипуляции с данными и со сценой. В качестве очков использовались oculus rift dk2, а в качестве контроллера leap motion. Программный код разработан при помощи Unity на языке C#. Реализованное приложение позволяет оператору манипулировать данными и сценой в виртуальном окружении. Для удобной работы с восстановленной голограммой разработано меню. В нем пользователь может в реальном времени выбрать объект и изменить его положение, выбрать отдельный спектральный слой объекта для отображения его пространственных характеристик, выбрать глубину, а также сохранить координаты рассматриваемого фрагмента для последующего возврата к нему.

#### *Список литературы*

1. Каленков Г.С., Каленков С.Г., Штанько А.Е. Гиперспектральная голографическая фурье-микроскопия. // Квантовая электроника 2015. Т.45. №4. С.333-338.
2. Kalenkov S.G., Kalenkov G.S., Shtanko A.E. Spectrally-spatial Fourier-holography. // Optics Express. 2013. V.21. Is.21. P.24985-24990.
3. Kalenkov G.S., Kalenkov S.G., Shtanko A.E. Hyperspectral Holographic Fourier-Microscopy. // Imaging and Applied Optics 2014, OSA Technical Digest (online). 2014. DTh3B.7.

Н.В. ПЕТРОВ<sup>1</sup>, И.А. ШЕВКУНОВ<sup>1</sup>, А.В. БЕЛАШОВ<sup>1,2</sup>,  
С.С. НАЛЕГАЕВ<sup>1</sup>, С.Э. ПУТИЛИН<sup>1</sup>, Й.-Ч. ЛИН<sup>3</sup>, Ч.-Ж. ЧЖЭН<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>Университет ИТМО, Санкт-Петербург

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

<sup>3</sup>Тайваньский государственный педагогический университет, Тайбэй, Тайвань

## ОСЕВАЯ ГОЛОГРАФИЯ С РАЗРЕШЕНИЕМ ВО ВРЕМЕНИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОГО НЕЛИНЕЙНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Представлена техника осевой голографии с разрешением во времени, позволяющая исследование оптического нелинейного взаимодействия в прозрачных средах. Луч накачки, обладающий достаточной энергией, чтобы возбудить нелинейное изменение показателя преломления, падает под углом на исследуемый объект, который зондируется пробным лучом. В результате регистрируется осевая голограмма, которая содержит в себе дифракционную картину, зависящую от оптических нелинейных свойств материала, толщины объекта, угла падения и длительности излучения в пучке накачки. В докладе представлены результаты численного моделирования и эксперимента.

N.V. PETROV<sup>1</sup>, I.A. SHEVKUNOV<sup>1</sup>, A.V. BELASHOV<sup>1,2</sup>,  
S.S. NALEGAEV<sup>1</sup>, S.E. PUTILIN<sup>1</sup>, Y.-C. LIN<sup>3</sup>, C.-J. CHENG<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>ITMO University, Saint Petersburg

<sup>2</sup>Ioffe physical-technical institute of the RAS, Saint-Petersburg

<sup>3</sup>National Taiwan Normal University, Taipei, Taiwan

## TIME-RESOLVED INLINE HOLOGRAPHY FOR INVESTIGATION OF OPTICAL NONLINEAR INTERACTION

Time-resolved inline holography technique for the investigation of optical nonlinear interaction in transparent samples is presented. High-energy pump beam passes through the sample at a certain angle and excites the optical nonlinear effects. Probe beam operated with adjusted delay reveals the nonlinear changes in the refractive index by forming the diffraction pattern. It depends from the optical nonlinear properties of the sample, their thickness, pump beam incident angle and duration of the pump beam.

По мере освоения технологий создания импульсных источников лазерного излучения короткой и сверхкороткой длительности открывались возможности для исследования быстропротекающих процессов: в пределах миллисекунд [1, 2], наносекунд [3, 4], и пикосекунд [5], После

этих работ появилась и первая работа по цифровой голографии в осевой конфигурации с фемтосекундным разрешением [6].

Данная работа продолжает эту тематику. Импульс накачки, падая под некоторым углом на прозрачный образец, наводит в нем нелинейное изменение показателя преломления, пропорциональное его плотности мощности. Это изменение сохраняется на время равное длительности импульса накачки, после чего начинается релаксация по экспоненциальному закону. Из-за малой пространственной области взаимодействия, обусловленной эффектом сноса, пучок накачки изменяет профиль показателя преломления в некоторой локальной области образца, а положение этой области регулируется линией задержки (см. горизонтальную развертку на рис. 1), которая обеспечивает временной сдвиг пучка накачки относительно пробного. В результате дифракции пробного импульса на возникшей неоднородности, образуется дифракционная картина, которая регистрируется на осевой голограмме и извлекается с помощью техники Фурье-фильтрации (рис. 1). Анализ данной дифракционной картины позволяет методами восстановления осевых голограмм, и методами численного моделирования исследовать процессы оптического нелинейного взаимодействия, и их зависимость от оптических нелинейных свойств материала, толщины объекта, угла падения и длительности излучения в пучке накачки.

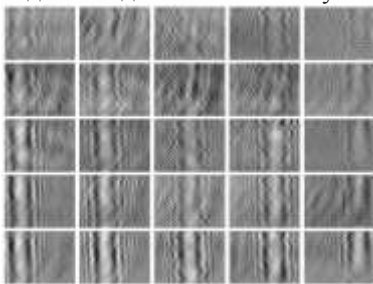


Рис. 1. Полученные из эксперимента дифракционные картины

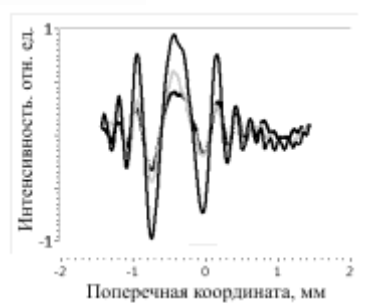


Рис. 2. Поперечное сечение дифракционных картин при разных мощностях накачки

#### Список литературы

1. Schedin S., et al. // Appl. Opt. 1999. V.38 (34). P.7056.
2. Schedin S., et al. // Appl. Opt. 2001. V.40 (1). P.100.
3. Liu Z., Steckman G.J., Psaltis D. // Appl. Phys. Lett. 2002. V.80 (5). P.731.
4. Liu Z., et al. // Opt. Lett. 2002. V.27 (1). P.22.
5. Rokitski R., Sun P.-C., Fainman Y. // Opt. Lett. 2001. V.26 (15). P.1125.
6. Centurion M., et al. // Opt. Lett. 2004. V.29 (7). P.772.

Л.А. НАЙДЕН, И.К. ЦЫГАНОВ, С.Б. ОДИНОКОВ

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

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ ЦВЕТНЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК**

В работе исследуются различные методы расчета параметров пикселей, содержащихся в цветных радужных голограммах. Рассматриваются голограммы, изготовленные по технологии Dot-Matrix, которые содержат дифракционные решетки с различными периодами и ориентациями. Исходные данные для расчета получаются из графического файла, содержащего входное изображение. Анализ методов проводился исходя из степени соответствия получаемого цвета от голограммы цвету входного изображения. Рассмотрены метод расчета параметров голографического пикселя с использованием цветовой диаграммы Международной Комиссии по освещенности (МКО) и метод с использованием колориметрической системы RGB.

L.A. NAYDEN, I.K. TSYGANOV, S.B. ODINOKOV

*Bauman Moscow State Technical University*

## **STUDY OF COLOR HOLOGRAPHIC IMAGES PRODUCING METHODS BY USING DIFFRACTION GRATINGS**

We consider different methods of calculating the parameters of pixels contained in the color rainbow holograms. Considered hologram made by Dot-Matrix technologies that contain gratings with different periods and orientations. Initial data for calculation are obtained from an image file containing the input image. Analysis of methods carried out on the basis of the extent to which the resulting color of the label the color of the input image.

В результате расчета цветных голограммных изображений мы должны получить набор дифракционных решеток, воссоздающих цвет в пикселе голограммы, максимально приближенный к цвету в соответствующем пикселе входного изображения. Среди искомым параметров выделяют следующие [1]:

- 1) период голографической дифракционной решетки, он определяет длину волны излучения, дифрагировавшего от источника белого света;
- 2) ориентацию голографической дифракционной решетки, она определяет угол поворота пластинки с голограммой при восстановлении определенного рисунка. Меняя ориентации можно добиться плавного

изменения изображения при повороте голограммы, тем самым создавая эффект движения изображения (кинеграммный эффект) или резкой смены изображений (switch-эффект);

3) параметры рельефа – глубина и вид профиля, которые, в конечном счете, определяют яркость дифрагированного от конкретного пиксела излучения. Также яркость дифрагированного излучения можно изменять площадью занятой дифракционными решетками, при сохранении параметров рельефа.

Описанные выше параметры дифракционных решеток достаточно легко могут быть описаны в колориметрической системе HSB, где период дифракционной решетки соответствует координате Hue (цветовой тон), а яркость дифрагированного излучения соответствует координатам Saturation (насыщенность) и Brightness (яркость).

Исходное изображение для радужных голограмм в большинстве случаев создается при помощи графических редакторов на компьютере. В результате получается растровый файл, в котором изображение представлено в виде конечного набора пикселей[2]. Пиксели содержат информацию о цвете, описанную в колориметрической системе RGB. Известны формулы для преобразования цветовых координат между колориметрическими системами HSB и RGB. Этот факт позволяет нам осуществлять расчет параметров голографических дифракционных решеток по данным из входного графического файла.

Хотя получение цвета, используя систему RGB, широко применяется во многих областях, и RGB-система может быть использована для передачи широкого диапазона цветов, она все равно не может охватить все возможные цвета на диаграмме МКО. Для того чтобы избавиться от этого недостатка и полностью задействовать возможность цветопередачи с помощью дифракционных решеток, будем использовать метод воссоздания цвета в колориметрической системе МКО (1931).

Известно, что границей цветовой диаграммы МКО являются спектрально чистые цвета в диапазоне длин волн от 380 нм до 780 нм. Выбрав достаточное количество дифракционных решеток, создающих цвета близкие к границе цветовой диаграммы МКО, можно легко воссоздать практически все цвета, расположенные внутри диаграммы путем комбинации различных дифракционных пикселей.

#### *Список литературы*

1. Magnusson R., Gaylord T.K. Diffraction efficiencies of thin phase gratings with arbitrary grating shape. // J. Opt. Soc. Am. 1978. V.68. №6. P.87-93.
2. Davis F.S. Holographic image conversion method for making a controlled holographic grating. Patent US 5262879. 16.09.1993.

А.П. ЗИНОВЬЕВ

*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород*

## **ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДА РЕКОНСТРУКЦИИ ДАННЫХ В ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ**

Предложен метод реконструкции цифровой голограммы, зафиксированной по схеме Габора. Показано полное устранение краевых искажений, а так же увеличение количества восстановленных данных в пределах углового спектрального разрешения цифровой фотоприёмной матрицы.

A.P. ZINOVIEV

*Institute of Applied Physics of the RAS, Nizhny Novgorod*

## **OPTIMIZATION OF THE DATA RECONSTRUCTION METHOD IN THE DIGITAL HOLOGRAPHY**

The method of reconstruction of the Gabor's digital hologram was suggested. The full elimination of called wrap-around error, and also increasing numbers in the restored data within ranging angular spectral permission of a digital photosensitive matrix was demonstrated.

Возросший за последнее десятилетие интерес к цифровой голографии связан с развитием технологии цифровых матричных фотоприёмников (CCD, CMOS). Хотя прогресс фотоматриц идёт стремительными темпами и размер одного приёмного элемента вплотную приближается к 1 мкм [1], однако это в разы больше длины волны широко распространённых и доступных когерентных источников видимого диапазона. По этой причине наибольшее распространение получили осевые или малоугловые оптические схемы регистрации цифровой голограммы [2, 3]. Восстановление зарегистрированных данных осуществляется с помощью решения интеграла Кирхгофа-Френеля методами дискретного преобразования Фурье (ДПФ) [2, 3].

На этапе реконструкции возникает ряд технических трудностей. Как правило, для ускорения вычислений используют вместо ДПФ быстрое преобразование Фурье (БПФ). А БПФ жестко «привязан» к отсчётам кратным  $N$ -ой степени 2. И в этот момент возникает дилемма: так как у подавляющего большинства фотоприёмных цифровых матриц количество регистрирующих элементов по горизонтали и вертикали не кратны степеням 2, то либо надо из цифровой голограммы вырезать квадратную



область с количеством пикселей кратным степени 2 и потерять часть информации, либо каким-то образом «достроить» изображение до квадрата со стороной  $2^N$  пикселей  $\geq$  наибольшего количества столбцов или рядов фотоматрицы. Чаще всего голограмму дополняют нулевыми значениями. При восстановлении данных возникает искажение в виде системы полос (рис. 1б), с которыми борются различными методами [4, 5]. Стоит отметить, что в работе [4] предложен метод бикубической экстраполяции, который решает проблему краевых искажений, но требует дополнительных вычислительных затрат.

В данной работе предлагается метод заполнения увеличенной цифровой голограммы на основе физических принципов. Кроме того, что не требуется экстраполяционных вычислений, увеличивается количество реконструированных данных (рис. 1в) без увеличения размера исходной голограммы.

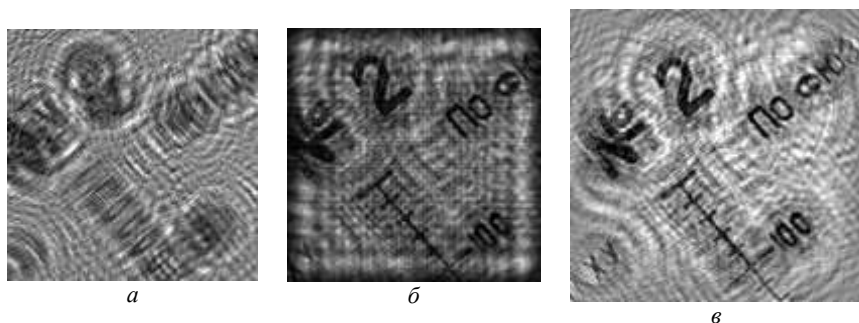


Рис. 1. Тестовая голограмма (а) и восстановленные данные при дополнении нулевыми значениями (б) и по предлагаемой методике (в)

#### Список литературы

1. <http://www.visionconnection.com/USB-3.0-Fast-Speed-Cameras.html>.
2. Schnars U., Jueptner W. // Meas. Sci. Technol. 2002. 13. R85–R101.
3. <http://www.digitalholography.eu/varasto/Real3D-Deliverable2-1-public.pdf>.
4. Дёмин В.В., Ольшукоев А.С., Наумова Е.Ю., Мельник Н.Г. // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т.21. №12. С.1089-1095.
5. Ohmi K., Panday S.P., Basanta J. // Тезисы конференции: FLUCOME'2009. Москва, 2009. №237.

Е.Ю. ЗЛОКАЗОВ<sup>1</sup>, М.С. КОВАЛЕВ, Г.К. КРАСИН,  
П.И. МАЛИНИНА, С.Б. ОДИНОКОВ, В.Е. ТАЛАЛАЕВ  
*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*  
<sup>1</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ГОЛОГРАММ ФРЕНЕЛЯ ДЛЯ ДАТЧИКА ВОЛНОВОГО ФРОНТА**

Разработан численный алгоритм расчета голограмм Френеля.

E.Yu. ZLOKAZOV<sup>1</sup>, M.S. KOVALEV, G.K. KRASIN,  
P.I. MALININA, S.B. ODINOKOV, V.Ye. TALALAEV  
*Bauman Moscow State Technical University*  
<sup>1</sup>*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)*

## **NUMERICAL CALCULATION OF FRESNEL HOLOGRAM FOR HOLOGRAPHIC OPTICAL SENSORS**

Numerical calculation algorithm for Fresnel holograms is developed.

Одним из направлений голографии, в последнее время набирающих обороты, является компьютерная голография, в которой используются компьютерно-синтезированные голограммы (КСГ). КСГ делятся на голограммы Фурье и Френеля. В теории их качество должно совпадать, но на практике это не так. Голограммы Фурье исследованы гораздо лучше и чаще встречаются в технике, в то время как голограммы Френеля практически не используются, и потому, на сегодня, уступают им по качеству. Голограммы Фурье подразумевают использование линз в оптическом приборе, в то время как для голограмм Френеля линзы не нужны. Таким образом, использование голограмм Френеля позволяет уменьшить габариты и стоимость оптического прибора. Одним из применений голограмм Френеля может быть голографический датчик волнового фронта [1, 2]. Также преимуществами голограмм Френеля в данной задаче является один рабочий порядок дифракции, в отличие от двух порядков дифракции голограмм Фурье.

На данный момент одним из алгоритмов синтеза голограмм Френеля является использование произведения быстрого преобразования Фурье (БПФ) от объекта, с экспонентой из интеграла Френеля, отвечающей за расстояние [3]. Далее существует алгоритм,

предложенный в [4], в котором преобразования Френеля от объекта ведется поэлементно. Алгоритм не использует стандартных функций, таких как БПФ, а производит численный расчет поэлементно, как итог качество голограммы получается выше. Этот алгоритм уже дает возможность получить хорошее изображение объекта на конечном расстоянии.

Взяв за основу этот алгоритм, мы исследовали зависимость интенсивности изображения от разных параметров, таких как шаг дискретизации, расстояние до голограммы (рис. 1). Путем поиска оптимальных значений нам удалось добиться существенного улучшения самой голограммы и, как следствие, восстановленного изображения. Следующим этапом будет проведение эксперимента по записи и восстановлению такой голограммы.

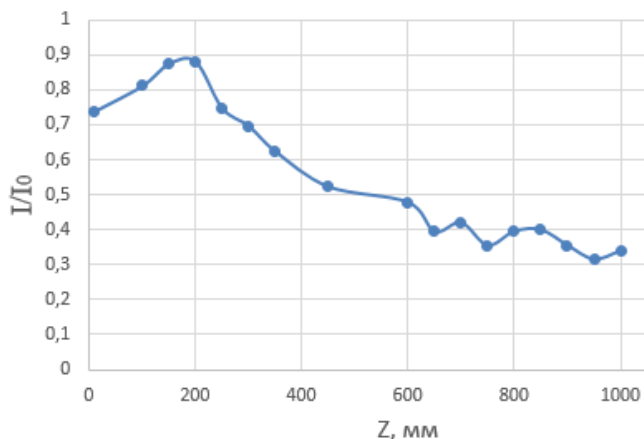


Рис. 1. Зависимость относительной интенсивности от расстояния до голограммы Z

#### Список литературы

1. Kodatskiy B., Kovalev M., Malina P., Odinkov S., Soloviev M., Venediktov V. Fourier holography in holographic optical sensors. // Proc. SPIE. V.10002. P.100020K.
2. Kovalev M.S., et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V.737. P.012064.
3. Poon T.-C., Liu J.-P. Introduction to Modern Digital Holography with Matlab. Cambridge University Press, 2014.
4. New Directions in Holography and Speckle /ed. by H. J. Caulfield, C.S. Vikram. Nashville: Fisk University, 2009.

П.В. ПАВЛОВ, А.Н. МАЛОВ, Ф.Н. ПОПОВ

*Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина,  
Воронеж*

**СПОСОБ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЕФЕКТОВ  
ВО ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЕ КОМПОЗИТНЫХ  
МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ  
СПЕКЛ-ФОТОГРАФИИ**

Рассмотрен способ определения глубины залегания дефектов во внутренней структуре композитных материалов на основе использования алгоритмов обработки цифровых спекл-фотографий для задач неразрушающего контроля. Экспериментально проведена оценка эффективности применения метода «шахматной доски» для задачи идентификации внутренних дефектов во внутренней структуре композитных материалов.

P.V. PAVLOV, A.N. MALOV, F.N. POPOV

*Air Force Academy named by prof. N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin, Voronezh*

**A METHOD FOR IDENTIFYING DEFECTS  
IN THE INTERNAL STRUCTURE OF COMPOSITE  
MATERIALS USING DIGITAL SPECKLE PHOTOGRAPHY**

The article features the method for determining the depth of defects in the internal structure of composite materials. Method is based on digital speckle image processing/ Efficiency of “chessboard” method for testing of structure of composite materials was evaluated during the experimental study.

К конструкциям современным летательным аппаратам предъявляется ряд требований, которыми должны обладать материалы для их изготовления, к каковым относятся: минимальная масса, максимальная прочность и жесткость, максимальный ресурс в эксплуатации и высокая надежность. Для таких условий лучше всего подходят композитные материалы. Обеспечение качества выпускаемой продукции из композитных материалов возможно только при применении методов и средств неразрушающего контроля (НК) [1]. На сегодняшний момент в области совершенствования оптических методов и устройств НК выполнен ряд исследований [2, 3] которые подтвердили возможность использования метода спекл-структур оптического излучения (МССОИ) для выполнения операций по НК деталей из композитных материалов.

Основным недостатком предлагаемого способа НК являлось то, что он позволяет лишь определять наличие и размеры внутреннего дефекта, но не позволяет установить глубину его залегания во внутренней структуре материала. Способность устройств НК определять глубину, на которой находится внутренний дефект (непроклей, расслоение) позволит повысить технологию ремонта выпускаемой продукции, за счет повышения выхода готовой продукции при дефиците исходного материала и высокой цене конечного продукта.

Для устранения недостатков в устройствах НК, принцип действия которых основан на использовании МССОИ, был разработан способ НК подповерхностной структуры полупрозрачных материалов [4]. В сочетании с программными модулями обработки спекл-фотографий алгоритмами автокорреляционного анализа и метода «шахматной доски» [5] исследована эффективность предлагаемого способа НК внутренней структуры деталей из композитных материалов.

С учетом особенностей реализации алгоритмов обработки спекл-фотографий на основе использования предлагаемого способа НК разработан программный модуль, который является дополнительным инструментом, входящим в состав программного комплекса НК на основе МССОИ.

Внедрение разработанного способа НК позволит контролировать внутреннюю структуру деталей и элементов конструкции летательных аппаратов из композитных материалов на всем их жизненном цикле.

#### *Список литературы*

1. Воробей В.В., Маркин В.Б. Контроль качества изготовления и технология ремонта композитных конструкций. Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2006.
2. Павлов П.В., Петров Н.В., Горюнов А.Е., Малов А.Н. Контроль композитных материалов с применением вихревых лазерных пучков // Известия высших учебных заведений. Физика. 2015. Т.58. №11-3. С.179-183.
3. Горюнов А.Е., Павлов П.В., Петров Н.В. Неразрушающий контроль композитных материалов по анализу параметров цифровой спекл-фотографии // Труды военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2014. №645. С.132-135.
4. Петров О.С., Павлов П.В., Левшин Е.А. Способ неразрушающего контроля подповерхностной структуры полупрозрачных объектов. Патент РФ №2563334 РФ; заяв. №2014125647 от 24.06.14; опубл. 20.09.15. Бюл. №26.
5. Павлов П.В., Попов Ф.Н. Программный модуль неразрушающего контроля внутренней структуры полупрозрачных материалов. // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации. 2016. №6-2. С.158-164.

А.А. ДЬЯЧЕНКО<sup>1,2</sup>, В.П. РЯБУХО<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский Саратовский государственный университет*

<sup>2</sup>*Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов*

## **ПРОЯВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ И ВРЕМЕННЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В ПОЛИХРОМАТИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ МИКРОСКОПИИ**

Рассмотрено теоретическое описание процессов формирования интерференционных картин. Показано влияние пространственных и временных спектральных свойств оптической системы, таких как спектральный состав излучения, спектральная чувствительность цифровых датчиков регистрации изображений, угловая апертура микрообъектива, на регистрируемое интерференционное изображение. Показано изменение в цветовой структуре интерференционной картины в зависимости от спектральных свойств исследуемого объекта и угловой апертуры освещающего поля.

A.A. DYACHENKO<sup>1,2</sup>, V.P. RYABUKHO<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Saratov National Research State University*

<sup>2</sup>*Institute of Precision Mechanics and Control of the RAS, Saratov*

## **EFFECT OF SPATIAL AND TEMPORAL SPECTRAL PROPERTIES OF THE OPTICAL SYSTEMS IN POLYCHROMATIC INTERFERENCE MICROSCOPY**

Theoretical description of forming interference pattern processes is presented. Effect of spatial and temporal spectral properties of the optical systems (frequency content of illumination, spectral sensitivities of digital detectors of image recording) is shown. Influence of angular aperture of illumination is taken into account. Changes in structure of interference pattern versus spectral properties of research object are shown.

В микроскопии на структуру интерференционного сигнала и изображения оказывают значительное влияние пространственные и временные спектральные свойства оптической системы, включая спектральные свойства объекта, среди которых частотный состав освещения [1], спектральная чувствительность датчиков регистрации изображения [2], угловая апертура освещающего объект поля, увеличение которой при использовании протяженного источника приводит к декорреляции интерференционного сигнала от слоистого объекта [3].

При увеличении апертурной диафрагмы осветителя микроскопа расширяется угловой спектр волнового поля, падающего на слоистый объект. В результате оптическая разность хода волн  $\Delta$ , формирующих интерференционное изображение тонкого слоя объекта, становится зависимой от угловой апертуры освещающего поля. Это приводит к изменениям интерференционной картины - к сдвигу интерференционных полос [4, 5], падению их контраста [5] и изменению интерференционного цвета изображения при той же оптической толщине слоя.

В работе исследовалось влияние указанных выше свойств на цветовую структуру интерференционной картины. Проводилось моделирование интерференционных изображений объектов с переменной в пространстве толщиной прозрачного слоя. Исследования показали уменьшение контраста интерференционной картины при изменении угловой апертуры освещающего объект поля. Кроме того в модели и натурном эксперименте проявилось влияние спектральных свойств цветных матричных фотодетекторов записи изображений - их спектральная чувствительность. Рассмотрены спектральные контуры пропускания фильтров с центральными длинами волн для соответствующего цветового канала 610, 540 и 460 нм и различными значениями ширины контуров. На рис. 1 представлен пример смоделированного интерференционного изображения объекта с изменяющейся по квадратичному закону оптической толщиной в диапазоне от 0 до 2 мкм от периферии к центру.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект №16-19-10528).

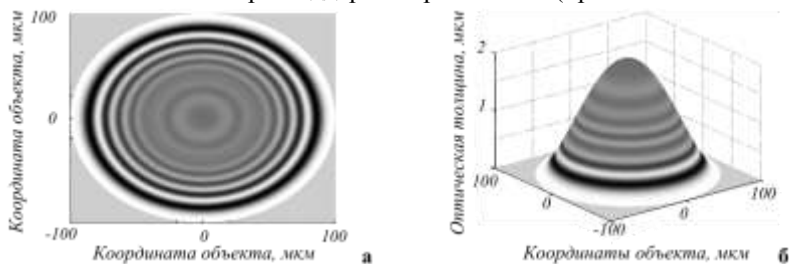


Рис. 1. Смоделированные интерференционные изображения слоя объекта: распределение интенсивности в интерференционном изображении (а), трехмерное интерференционное изображение (б)

#### Список литературы

1. Chavel P., Jonathan J.-M. // Proc. SPIE. 2002. V.4588. P.222.
2. Brundavanam M., Viswanathan N., et. al. // J. Opt. Soc. Amer. 2009. V.26. №12. P.2592.
3. Abdulhalim I. // Ann. Phys. 2012. V.524. No.12. P.787.
4. Sheppard C.J.R., Larkin K.G. // Appl. Opt. 1995. V.34. No.22. P.4731.
5. Захарьевский А.Н. // Измерительная техника. 1957. №2. С.20-22.

О.А. ГУРЫЛЕВ, С.Б. ОДИНОКОВ, Д.С. ЛУШНИКОВ,  
А.Ю. ЖЕРДЕВ, М.В. ШИШОВА

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

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ  
СИСТЕМЫ ДАТЧИКА ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ  
НА ОСНОВЕ ЧЕТЫРЁХСЕКЦИОННОЙ  
ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЁТКИ**

Разработана оптическая схема датчика линейных перемещений на основе четырехсекционной дифракционной решетки. Создана математическая модель датчика линейных перемещений в программе Matlab. Исследованы оптические свойства материалов подложек. Рассчитаны допуски на взаимное расположение измерительных шкал и их влияние на измерение перемещения.

O.A. GURYLEV, S.B. ODINOKOV, D.S.LUSHNIKOV,  
A.Yu. ZHERDEV, M.V. SHISHOVA  
*Bauman Moscow State Technical University*

**DESIGN AND RESEARCH AN OPTICAL SYSTEM  
OF LINEAR ENCODER BASED ON FOURSECTIONAL  
DIFFRACTION GRATING**

Developed the optical scheme of linear encoder based on foursectional diffraction grating. Create a mathematical model of the linear encoder in Matlab program. Research the optical properties of the substrate materials. Calculated tolerances on the relative position of the measuring scales and their impact on the measurement of displacement.

Оптические датчики линейных перемещений позволяют осуществлять бесконтактный контроль перемещений отдельных узлов прецизионных станков с повышенной точностью [1]. Оптическая схема датчика состоит из: источника излучения, системы формирования пучка, анализирующей шкалы, кодирующей шкалы и блока приемников излучения. Большинство оптических схем датчиков является симметричными относительно центрально пучка [2]. Четырехсекционная структура дифракционной решетки позволяет значительно уменьшить габариты датчика линейных перемещений и уменьшить влияние деюстировки узлов на качество интерференционного сигнала в плоскости приемников излучения.

Целью работы является разработки и исследование оптической системы датчика линейных перемещений на основе четырехсекционной



дифракционной решетки (рис. 1а). В качестве источника излучения используется лазерный диод с длиной волны 625 нм.

Излучение проходит через анализирующую и кодирующую шкалы и дифрагирует в разные порядки, которые интерферируют в плоскости приемников излучения. По разности фаз интерференционных сигналов мы получаем информацию о пройденном расстоянии и направлении движения [3]. Период  $T$  всех решеток является постоянным и одинаковым. Четыре вторичные пропускающие дифракционные решетки выполнены встык друг с другом в виде единого элемента с четырьмя зонами, дифракционные решетки в которых смещены относительно друг друга на  $\frac{1}{4}$  периода по нарастающей, то есть  $\frac{1}{4} T$ ,  $\frac{1}{2} T$  и  $\frac{3}{4} T$ , и установлены в одном направлении (рис. 1б). Блок приемников излучения состоит из четырех смежных приемников принимающих оптические сигналы от соответствующих зон вторичной пропускающей дифракционной решетки.

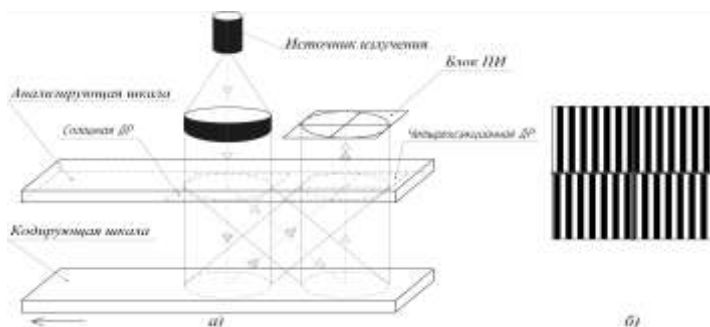


Рис. 1. Оптическая схема датчика линейных перемещений (а) и четырехсекционная дифракционная решетка (б)

Разработанная конструкция датчика уменьшает габариты системы в 2 раза и позволяет измерять перемещение с точностью 1 нм.

Работа выполнена в МГТУ им. Н.Э. Баумана при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения Соглашения о предоставлении субсидии № 14.577.21.0197 (ID RFMEFI57715X0197)

#### Список литературы

1. Коротаев В.В., Прокофьев А.В., Тимофеев А.Н. Оптико-электронные преобразователи линейных и угловых перемещений. СПб: НИУ ИТМО, 2012.
2. Pettigrew R.M. Displacement measuring apparatus and method. Patent US4776701 A. 11.10.1988.
3. Spies A., Teimel A. Position measuring apparatus utilizing two beam interferences to create phase displaced signals. Patent US 5120132 A. 09.06.1992.

**А.В. КРАЙСКИЙ, В.А. ПОСТНИКОВ<sup>1</sup>,  
М.А. ШЕВЧЕНКО, Т.Т. СУЛТАНОВ**

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

*<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт физико-химической медицины, Москва*

## **О ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ГЛЮКОЗЫ В ПЛАЗМЕ КРОВИ С ПОМОЩЬЮ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ**

Сравниваются экспериментально полученные в работе среднеквадратичные разбросы измерения глюкозы с помощью голографического сенсора с требованиями на клинические лабораторные методы и электронные глюкометры, определенными в стандартах ГОСТ Р ИСО 5725-1 и ISO15197-2013.

**A.V. KRAISKY, V.A. POSTNIKOV<sup>1</sup>,  
M.A. SHEVCHENKO, T.T. SULTANOV**

*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

*<sup>1</sup>Federal Research and Clinical Center of Physical-Chemical Medicine, Moscow*

## **ON THE ACCURACY OF DETERMINING THE CONCENTRATION OF GLUCOSE IN THE BLOOD PLASMA USING HOLOGRAPHIC SENSORS**

We compare the experimentally obtained root mean square spreads of glucose measurement using a holographic sensor with the requirements of clinical laboratory techniques and electronic glucometers defined in the standards ГОСТ Р ИСО 5725-1 и ISO15197-2013.

Голографические сенсоры представляют собой голограммы Денисюка, записанные в матрице полимерного гидрогеля (толщиной 10-50 мкм), связанного со стеклянной подложкой. В матрицу встраиваются специальные вещества, которые под действием тестируемого компонента раствора вызывают изменение набухания гидрогеля. Это приводит к изменению периода структуры, и, следовательно, к изменению длины волны отраженного излучения. Таким образом, по изменению длины волны с помощью спектрального прибора, или даже визуально, можно судить о концентрации определяемого компонента. Матрица сенсора для определения глюкозы представляет собой трехмерную полимерную сетку содержащую производные аминифенилборной кислоты. При определении концентрации глюкозы важной является оценка точности проведенных

измерений. Точность измерений характеризуется величиной случайной и систематической погрешности их результатов.

Случайная составляющая погрешности результата измерения характеризует прецизионность, т.е. степень близости друг к другу независимых результатов измерений, полученных в конкретных регламентированных условиях. Для количественных методов исследований разрабатываются требования к характеристикам повторяемости и прецизионности, отражающим размер случайной погрешности, проявляющейся в дисперсии результатов однородных измерений и выраженной среднеквадратичным отклонением или коэффициентом вариации. По требованию ГОСТ Р ИСО 5725-1 минимальное целевое значение случайной погрешности при определении концентрации глюкозы в сыворотке – 1,63%, минимальное предельно допустимое значение – 2,23%.

По требованию международного стандарта ISO15197-2013 для электронных глюкометров, при содержании глюкозы свыше 5.55 ммоль/л не менее 95% результатов глюкометра должны отклоняться от результатов эталонного анализатора не более, чем на 15%, а при содержании глюкозы до 5.55 ммоль/л – на 0.83 ммоль/л. Один из таких эталонных анализаторов «YSI 2300 STAT PLUS» имеет предел 2% относительного стандартного отклонения измерений не превышающий.

Для определения случайной составляющей погрешности измерений (прецизионности) данного метода, в работе записывались спектры отражения голографического сенсора в стационарных условиях и измерялись положения их максимумов, затем определялось стандартное отклонение. В эксперименте с чувствительностью матрицы к глюкозе 58,14 нм/мМ стандартное отклонение (СО) составило 0,05 нм. Из этих двух величин находится прецизионность определения глюкозы в разведенном растворе- 0,86мкМ, и с учетом степени разведения (1:17), абсолютное значение прецизионности в исходном растворе составляет 0,015 мМ, относительная - 0,3%. При максимальной чувствительности изготовленных нами сенсоров – 440 нм/мМ прецизионность определения глюкозы в исследуемом растворе составит – 0,11мкМ.

Таким образом, экспериментально определенная величина случайного разброса, или прецизионности, голографического метода в 5-7 раз превышает требования к этому параметру по стандартам для лабораторных исследований, и эталонных анализаторов для электронных глюкометров. При максимальной чувствительности, данная величина может быть улучшена еще на 2 порядка.

А.Е. АНГЕРВАКС, К.А. АКСЕНОВА, А.И. РЫСКИН  
*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ ОБЪЕМНЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ СРЕДНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА СПЕКТРА**

Предложена методика создания объемных голографических фильтров, которые могут быть использованы в средней инфракрасной (ИК) области спектра. Фильтры записываются в кристалле  $\text{CaF}_2$  (флюорит) с фотохромными центрами окраски. Постэкспозиционная фототермическая обработка кристалла с голограммой изменяет его спектр поглощения, что позволяет считывать фазовую голограмму в средней ИК-области спектра до 10 мкм. Обсуждается методика фототермической обработки кристаллов, приведены голографические характеристики фильтров.

A.E. ANGERVAKS, K.A. AKSENOVA, A.I. RYSKIN  
*ITMO University, Saint-Petersburg*

## **MID-IR INFRARED VOLUME HOLOGRAPHIC FILTERS CREATION METHOD**

Method of mid-infrared volume holographic filters creation is proposed. Filters are recorded in calcium fluoride ( $\text{CaF}_2$ ) crystals with photochromic color centers. Photothermal treatment of the crystal with hologram results in transformation of its absorption spectrum, that allows reading out phase hologram in the mid-IR spectral range up to 10  $\mu\text{m}$ . Method of photothermal treatment of crystals and holographic filters characteristics are discussed.

При решении тех или иных научных/технических задач для выделения нужного диапазона длин волн используются преимущественно интерференционные фильтры. Однако в ряде случаев, например, при стабилизации модового состава излучения диодных лазеров, требуется фильтрация со спектральной селективностью от единиц до сотых долей нанометра. Подобную фильтрацию можно осуществить только с помощью объемной фазовой голограммы. В видимой и ближней ИК области спектра такие голограммы-фильтры создаются на основе фототерморелактивных стекол [1–3]. Однако их пропускание ограничено длиной волны 2.7 мкм.

Целью настоящей работы является демонстрация возможности использования кристаллов  $\text{CaF}_2$  с фотохромными центрами окраски в качестве голографической среды в диапазоне длин волн до 10 мкм.

Использование кристаллов  $\text{CaF}_2$  с центрами окраски в качестве голографической среды основано на фототермическом превращении центров окраски. Специфический диффузионно-дрейфовый механизм записи голограмм в этих кристаллах делает возможным проводить запись голограммы видимым излучением, а ее постэкспозиционная фототермическая обработка позволяет перестраивать спектр поглощения образца, в котором она записана (изменять тип формирующих голограмму центров окраски), и приближать полосы поглощения к длине волны, на которой осуществляется считывание, увеличивая, тем самым, дифракционную эффективность голограммы. При этом жесткое фототермическое воздействие не приводит к ее распаду [4, 5].

В ходе выполнения работы были подобраны режимы фототермической обработки кристаллов с голограммами для получения дифракционного отклика на заданных длинах волн в среднем ИК диапазоне спектра (2.9–6 мкм).

С помощью преобразования Крамерса-Кронига по полученным в результате фотохромных преобразований спектрам поглощения были рассчитаны спектральные зависимости амплитуды модуляции показателя преломления кристаллов с голограммами и соответствующие дифракционные эффективности, значения которых уменьшаются при увеличении отстройки длины волны считывания от полосы поглощения преобладающих в кристалле центров окраски.

Получены оценки оптимальных эффективных толщин пропускающих и отражательных голограмм с периодами решетки 1–5 мкм, соответствующих 100% значениям дифракционной эффективности при считывании в указанной спектральной области.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-23-00136).

#### *Список литературы*

1. Glebov L. // Rev. Laser Eng. 2013. V.41. P.684.
2. Volodin B.L., Dolgy S.V., et. al. // Opt. Lett. 2004. V.29. P.1891.
3. Иванов С.А., Игнатьев А.И., Никоноров Н.В., Асеев В.А. // Оптический журнал. 2014. Т.81. С.72.
4. Щеулин А.С., Ангервакс А.Е., Аксенова К.А., Гайнутдинов Р.В., Рыскин А.И. // Оптика и спектроскопия. 2015. Т.118. С.572.
5. Shcheulin A.S., Angervaks A.E., Zakharov V.V., Veniaminov A.V., Ryskin A.I. // J. Opt. Soc. Am. B. 2014. V.31. P.248.

В.В. ШЕПЕЛЕВИЧ, А.В. МАКАРЕВИЧ, С.М. ШАНДАРОВ<sup>1</sup>  
*Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина,  
Беларусь*

<sup>1</sup>*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники*

## **ЗАВИСИМОСТЬ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОЛОГРАММ ОТ ТОЛЩИНЫ КРИСТАЛЛА ВТО**

Представлены результаты экспериментального исследования зависимостей дифракционной эффективности голограмм и коэффициента усиления предметной световой волны от толщины кристалла  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  среза  $(\bar{1}\bar{1}0)$  при его фиксированной пространственной ориентации.

V.V. SHEPELEVICH, A.V. MAKAREVICH, S.M. SHANDAROV<sup>1</sup>

*I.P. Shamyakin Mozyr State Pedagogical University, Belarus  
<sup>1</sup>Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*

## **THE DEPENDENCE OF THE OUTPUT CHARACTERISTICS OF HOLOGRAMS IN THE VTO CRYSTAL ON ITS THICKNESS**

Results of experimental research of dependence of the hologram diffraction efficiency and the subject light wave gain on the thickness of the  $(\bar{1}\bar{1}0)$  - cut  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  crystal at its fixed spatial orientation are represented.

Известно, что для эффективного практического применения фоторефрактивных кристаллов необходимо выбирать такие толщину  $d$  образца и азимут  $\Psi_0$  линейной поляризации взаимодействующих в нем световых волн, при которых достигаются высокие выходные характеристики записанных голограмм: дифракционная эффективность  $\eta$  и коэффициент усиления  $\gamma$  предметной световой волны. В этой работе на примере кристалла  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  (ВТО) среза  $(\bar{1}\bar{1}0)$  мы демонстрируем возможность изучения зависимостей  $\eta(d)$  и  $\gamma(d)$  при различных  $\Psi_0$  с использованием только одного образца с фиксированной толщиной  $d_0 = 7.7$  мм. В основе экспериментов лежит идея, предложенная в [1] и развитая в [2].

Результаты экспериментов представлены на рис. 1. Поверхности, описанные функциями  $\gamma(\Psi_0, d)$  и  $\eta(\Psi_0, d)$ , построены с учетом записи в кристалле ВТО смешанных голограмм [3]. Экспериментальные значения  $\gamma$  и  $\eta$  при  $\Psi_0 = 0, 45^\circ, 90^\circ$  и  $135^\circ$  показаны тёмными кружками. Сами эти

поверхности могут быть использованы для теоретического предсказания оптимальных значений  $\Psi_0$ , при которых для фиксированных значений  $d$  достигаются наибольшие значения  $\gamma$  и  $\eta$  (сплошные черные линии на графиках), что важно при практическом применении этого кристалла.

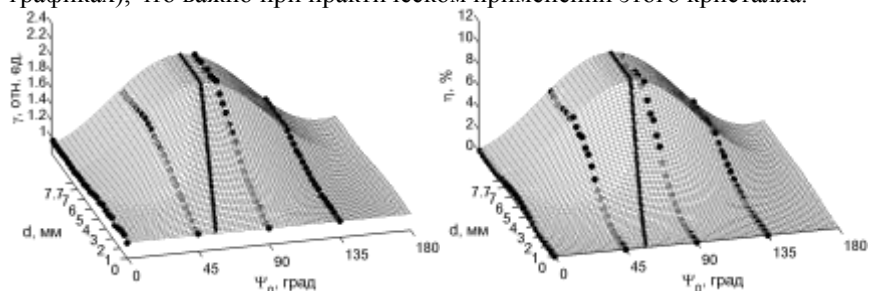


Рис. 1. Теоретически построенные поверхности  $\gamma(\Psi_0, d)$  и  $\eta(\Psi_0, d)$ , а также экспериментально полученные значения  $\gamma$  и  $\eta$  для кристалла ВТО среза  $(\bar{1}\bar{1}0)$  при  $\theta = 200^\circ$

При проведении экспериментов ориентационный угол кристалла  $\theta$  был выбран равным  $200^\circ$  (определение угла  $\theta$ , можно найти, например, в [3]), а время записи голограммы  $\tau$  приблизительно составляло 3 мин. При измерении  $\gamma$  отношение интенсивностей  $I_S/I_R$  предметного светового пучка к опорному до вхождения в кристалл было приблизительно равным 0.24, а при измерении  $\eta$  оно составляло 0.5. В расчетах использованы те же параметры ВТО, что и в [3]. Амплитуда напряженности поля пространственного заряда  $E_{SC}$  для  $\gamma$ , принималась равной 1.301 кВ/см, а для  $\eta$  –  $\approx 3.053$  кВ/см и соответствовала наилучшей корреляции результатов теории и эксперимента.

В заключение отметим, что при выполнении теоретических расчетов принимались во внимание обратный пьезоэлектрический и фотоупругий эффекты, влиянием которых в [1] пренебрегалось за счет специального выбора пространственных ориентаций кристалла.

#### Список литературы

1. Shamonina E., et al. Dynamic holography with none plane waves in sillenites // Opt. Quant. Electron. 1996. V.28. №1. P.25-42.
2. Макаревич А.В. и др. Экспериментальное исследование ориентационной зависимости дифракционной эффективности пропускающих голограмм от толщины кристалла  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  // Письма в ЖТФ. 2015. Т.41. №19. С.46-54.
3. Шепелевич В.В., Макаревич А.В., Шандаров С.М. Смешанные пропускающие голограммы в фоторефрактивном пьезокристалле  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  // Письма в ЖТФ. 2014. Т.40. № 22. С.83-89.

Р.В. РОМАШКО<sup>1,2</sup>, М.А. АСАЛХАНОВА<sup>2</sup>, Ю.Н. КУЛЬЧИН<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Дальневосточный федеральный университет, Владивосток*

<sup>2</sup>*Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток*

## **АДАПТИВНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР НА ОСНОВЕ ОРТОГОНАЛЬНОГО ТРЕХВОЛНОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ФОТОРЕФРАКТИВНОМ КРИСТАЛЛЕ**

Теоретические расчеты показывают, что адаптивный голографический интерферометр может быть полностью поляризационно-независимым в случае ортогонального трехволнового взаимодействия в фоторефрактивных кристаллах кубической симметрии (InP, CdTe). Представлены схема и экспериментальные зависимости эффективности работы адаптивного интерферометра от состояний поляризации взаимодействующих волн на примере записи динамических голограмм в кристалле InP.

R. V. ROMASHKO<sup>1,2</sup>, M. A. ASALKHANOVA<sup>2</sup>, Yu. N. KULCHIN<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Far Eastern Federal University, Vladivostok*

<sup>2</sup>*Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok*

## **ADAPTIVE INTERFEROMETER BASED ON ORTHOGONAL THREE-WAVE MIXING IN PHOTOREFRACTIVE CRYSTAL**

The scheme of adaptive holographic interferometer based on three-wave interaction in a photorefractive crystal is presented. Theoretical calculations show that such interferometer might be completely polarization-independent if waves interact in crystal in orthogonal geometry. The performance of adaptive holographic interferometer based on wave mixing in InP crystal is studied.

Адаптивные голографические интерферометры являются основой высокочувствительных измерительных систем для детектирования сверхмалых изменений физических величин, позволяющих проводить исследования вне лабораторий [1]. Однако адаптивные интерферометры, основанные на двухволновом взаимодействии световых волн в ФРК, в том числе и в ортогональной схеме [2], сильно зависят от состояний поляризации взаимодействующих волн. В работе [3] показано, что использование схемы адаптивного интерферометра, основанного на трехволновом смешивании в ортогональной геометрии записи голограмм



вместо двухволнового, может решить проблему поляризационного шума в демодуляционном сигнале или эти шумы будут значительно меньше.

Целью данной работы является экспериментальное исследование работы адаптивного интерферометра на основе ортогонального трехволнового взаимодействия в кристалле InP. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. На рис. 2 представлена зависимость изменений в интенсивности демодуляционного сигнала от азимутального угла объектной волны. Сплошными линиями представлен результат математического моделирования многоволнового взаимодействия в ФРК, маркерами – результат экспериментального исследования работы адаптивного интерферометра на основе ортогонального трехволнового взаимодействия в кристалле InP.

Как видно из рис. 2, интенсивность демодуляционного сигнала слабо зависит от состояния поляризации объектной волны, только если используются обе опорные волны, что служит экспериментальным подтверждением возможности создания полностью поляризационно-независимого адаптивного интерферометра на основе трёхволнового ортогонального взаимодействия в ФРК.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-12-01122).

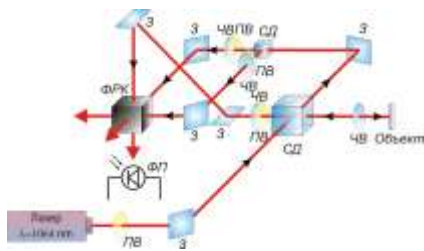


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (З - зеркала, ПВ - полуволновая пластинка, ЧВ - четвертьволновая пластинка, СД - светоделительный куб)

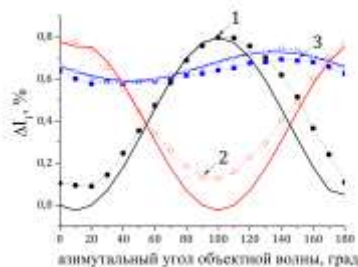


Рис. 2. Зависимость интенсивности демодуляционного сигнала от азимутального угла объектной волны: 1, 2 - двухволновое взаимодействие, 3 - трехволновое

#### Список литературы

1. Stepanov S.I. // International trends in optics. 1991. P.125-140.
2. Di Girolamo S., et al. // Optics Communications. 2010. V.283 (1). P.128-131.
3. Romashko R.V., Kulchin Yu.N., Kamshilin A.A. // Pacific Science Review. 2011. V.13 (3). P.252-254.

М.С. АШУРОВ, В.С. ГОРЕЛИК<sup>1</sup>, С.О. КЛИМОНСКИЙ  
*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*  
<sup>1</sup>*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

## **ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОДНОМЕРНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ**

Оптические свойства одномерных фотонных кристаллов на основе пористых пленок анодного оксида алюминия изучены путем регистрации спектров пропускания и зеркального отражения в видимой и ультрафиолетовой областях спектра. Получены угловые зависимости спектральных положений оптических стоп-зон. Показано, что коэффициент отражения в области первой стоп-зоны варьируется на поверхности образцов от точки к точке.

M.S. ASHUROV, V.S. GORELIK<sup>1</sup>, S.O. KLIMONSKY  
*Lomonosov Moscow State University*  
<sup>1</sup>*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

## **OPTICAL PROPERTIES OF ONE-DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTALS**

The optical properties of one-dimensional photonic crystals based on porous anodic aluminum oxide films have been studied by measuring transmittance and specular reflectance spectra in the visible and UV spectral regions. Angular dependences of the spectral positions of optical stop bands are obtained. It has been shown, that the maximum reflectance in the first stop band varies from point to point on sample surface.

В последнее время внимание исследователей привлекают так называемые фотонные кристаллы, представляющие собой новый тип искусственных структурно-организованных сред, диэлектрические свойства которых меняются периодически в одном, двух или трех измерениях с характерным пространственным масштабом периодичности порядка оптической длины волны [1]. Простейшими представителями такого рода материалов являются одномерные фотонные кристаллы, построенные из чередующихся слоев с толщинами  $a_1$  и  $a_2$  с отличающимися показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$ . В спектре такого кристалла обнаруживаются так называемые стоп-зоны области сильного отражения излучения (рис.1). Спектральные положения стоп-зон зависят от показателей преломления слоев, периода структуры и угла падения излучения на поверхность фотонного кристалла [2]. Изменение этих

параметров открывает возможность для управления оптическими свойствами такого рода материалов [3]. Настоящая работа посвящена детальному исследованию оптических свойств одномерных фотонных кристаллов на основе анодного оксида алюминия. Их оптические свойства изучены путем регистрации спектров пропускания и зеркального отражения в видимой и ультрафиолетовой областях спектра. Получены угловые зависимости спектральных положений оптических стоп-зон (рис. 2). Показано, что коэффициент отражения в области первой стоп-зоны варьируется на поверхности образцов от точки к точке.

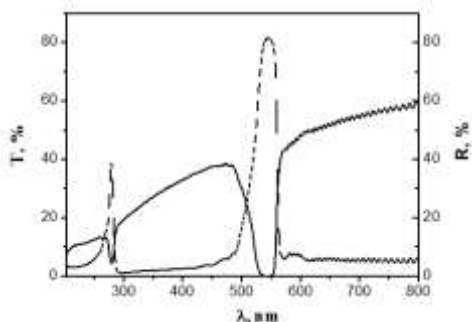


Рис. 1. Спектры пропускания в нормальном направлении (сплошная линия) и отражения под углом  $8^\circ$  (штриховая линия).

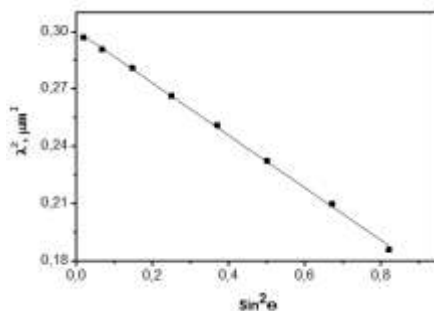


Рис. 2. Линейная аппроксимация зависимости  $\lambda^2$  от  $\sin^2 \theta$  для пика отражения под разными углами (для первой стоп-зон)

#### Список литературы

1. Yablonovitch E. // Phys. Rev. Lett. 1987. V.58 (20). P.2059.
2. Yisen L., Yi C., Zhiyuan L., Xing H., Yi L. // Electrochem. Commun. 2011. V.13. P.1336.
3. Gorelik V.S., Klimonsky S.O. // Optics and Spectroscopy. 2016. V.120 (4). P.534-539.

**А.А. КРАЙСКИЙ, А.В. КРАЙСКИЙ**

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

## **О СВОЙСТВАХ УВЕЛИЧЕНИЯ АМПЛИТУДЫ ПОЛЯ ВБЛИЗИ КРАЯ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ ОДНОМЕРНОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА**

В общем случае одномерного фотонного кристалла с помощью теории возмущений исследованы окна прозрачности вблизи запрещенной зоны. Получены выражения для зависимостей в кристалле коэффициента максимального усиления амплитуды поля, положения и ширины окон прозрачности от толщины кристалла  $H$  и номера окна  $n$ . Получены выражения для поля в кристалле и интенсивностей отраженного и проходящего света.

**A.A. KRAISKI, A.V. KRAISKI**

*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

## **ABOUT THE PROPERTIES OF INCREASING THE AMPLITUDE OF THE FIELD NEAR THE EDGE OF THE GAP ONE-DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTAL**

The transparency windows near the gap have been investigated by using of perturbation theory in a case of arbitrary one-dimensional photonic crystal. The dependences for the maximum increase of the field amplitude, position and width of the windows of transparency on the thickness of the crystal  $H$  and the window number  $n$  have been developed. The expressions for the field in the crystal, and the intensities of the reflected and transmitted light have been developed.

В настоящем сообщении рассмотрены общие закономерности распространения света сквозь одномерный фотонный кристалл (ФК) вблизи запрещенных зон (ЗЗ). Как известно, вблизи ЗЗ имеются окна высокого пропускания с пропусканием 100% в максимумах. В этих областях происходит также увеличение амплитуды поля [1-3].

В настоящей работе рассмотрен общий случай одномерного ФК. С помощью теории возмущений исследованы окна прозрачности вблизи ЗЗ. Получены выражения для зависимостей коэффициента максимального усиления амплитуды поля в кристалле, положения и ширины окон прозрачности от толщины кристалла  $H$  и номера окна  $n$ . Получены выражения для поля в кристалле и интенсивностей отраженного и проходящего света.

Поле в одномерном ФК описывается выражением

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} u(x) - \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon(x) u(x) = 0, \quad (1)$$

где  $\omega$  – частота,  $\varepsilon(x)$  – диэлектрическая проницаемость (ДП),  $u(x)$  – комплексная амплитуда электрического вектора светового поля. ДП есть одномерная периодическая функция с периодом  $a$  -  $\varepsilon(x+a)=\varepsilon(x)$ . При этом по теореме Блоха поле для неограниченной среды представимо в виде  $u(x)=\exp(iqx) \psi_q(x)$ , где  $\psi_q(x+a)=\psi_q(x)$ . Тогда уравнение (1) для поля вблизи края ЗЗ перепишем в виде ( $q_0$  соответствует границе ЗЗ):

$$H_0 \psi_{q_0-\Delta q}(x) + V(x) \psi_{q_0-\Delta q}(x) = E \psi_{q_0-\Delta q}(x), \quad \text{где } E = \omega^2/c^2,$$

$$H_0 = \frac{1}{\varepsilon(x)} \left[ q_0 - i \frac{\partial}{\partial x} \right]^2, \quad V(x) = -\Delta q \frac{2}{\varepsilon(x)} \left[ q_0 - i \frac{\partial}{\partial x} \right] + (\Delta q)^2 \frac{1}{\varepsilon(x)}$$

Беря в качестве невозмущенных собственных функций  $\psi_{q_0}(x)$ , строя теорию возмущений по  $\Delta q * a$  ( $\Delta q = q_0 - q$ ) и сшивая на границах (условия непрерывности поля и его производных) получаем выражение для поля световой волны с частотой вблизи края ЗЗ.

Анализируя полученное выражение, отметим:

1. Окна прозрачности расположены при  $\Delta q = \pi n / H$  ( $n$  – номер окна).
2. При попадании частоты распространяющегося света в окно прозрачности поле внутри кристалла сильно возрастает. В максимуме  $E_{max} = const * H / n$ .
3. Зависимость частоты окна имеет вид  $\omega = \omega_0 + const * n^2 / H^2$ .
4. Ширина окон прозрачности много меньше расстояния между ними  $\delta \omega = const * n^2 / H^3$ .

Точный расчет этих параметров с помощью компьютерной модели прохождения через ФК с синусоидальным профилем переменной части ДП для ряда толщин и числа окон показал удовлетворительное совпадение этих результатов с выводами, сделанными с помощью теории возмущений.

#### Список литературы

1. Bendickson J.M., Dowling J.P., Scalora M. // Physical Review E. 1996. V.53. P.4107-4121.
2. Hopman W.C.L., Hoekstra H.J.W.M., Dekker R., Zhuang L., de Ridder R.M. // Optics Express. 2007. V.15. P.1851-1870.
3. Figotin A., Vitebskiy I. // Waves in Random and Complex Media. 2006. V.16. P.293-382.

**И.Р. ПРУДНИКОВ**

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

**РЕЗОНАНСНОЕ ВОЗРАСТАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ  
СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ В ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ, СОСТОЯЩЕМ  
ИЗ ДВУХ 1-D ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ И ТОНКОЙ  
РАЗДЕЛИТЕЛЬНОЙ ПЛЕНКИ**

Проведено аналитическое исследование оптических свойств интерферометра Фабри-Перо, состоящего из двух 1-D фотонных кристаллов и ультратонкого разделительного слоя с толщиной в пределах от менее чем 1 нм до 10 нм. Показано, что резонансное возрастание интенсивности световой волны в таком слое возможно в результате динамической дифракции световой волны в упомянутых фотонных кристаллах. Обсуждаются возможности определения структурных параметров (например, толщин и показателей преломления) ультратонких разделительных пленок.

**I.R. PRUDNIKOV**

*Lomonosov Moscow State University*

**A RESONANT ENHANCEMENT OF LIGHT INTENSITY  
IN A 1-D PHOTONIC CRYSTAL-BASED INTERFEROMETER  
WITH A THIN SPACER FILM**

An optical Fabry-Pérot interferometer composed of two 1-D photonic crystals and an extremely thin spacer layer (its thickness changes from less than 1 nm to about 10 nm) is analytically investigated. It is shown that the resonant enhancement of light wave intensity in such a layer is possible because of light dynamical diffraction from the photonic crystals of the interferometer. Potentialities for the determination of the structural parameters (e.g., thicknesses and refraction indexes) of ultra-thin spacer films are discussed.

Нарушение строгой периодичности в фотонных кристаллах (ФК) приводит, наряду с другими возможными физическими эффектами, к появлению интенсивных/резонансных мод электромагнитного поля, локализованных в окрестностях дефектов [1, 2]. Эти моды, в свою очередь, определяют возникновение пиков (минимумов) коэффициента пропускания (коэффициента зеркального отражения) ФК кристалла в пределах фотонной запрещенной зоны [1, 2].

Если в 1-D периодическую многослойную фотонную структуру внедрен "дефектный" (дополнительный) слой, то такая структура представляет собой интерферометр/резонатор Фабри-Перо [3] с оболочкой из 1-D ФК. В настоящем сообщении показано, что в результате динамической дифракции световой волны в ФК, составляющих оболочку упомянутого интерферометра/резонатора, возможно резонансное возрастание интенсивности световой волны в дефектном слое, даже когда его толщина меньше 1 нм [4]. На рис. 1а приведена зависимость суммы,  $(\varphi_1+\varphi_2)$ , фаз коэффициентов зеркального отражения от двух ФК, между которыми заключен разделительный слой. Эта сумма меняется от  $\approx\pi/2$  до  $\approx-\pi/2$  в пределах запрещенной зоны ФК. Такое изменение фаз связано с динамической дифракцией световой волны в ФК. При длине волны  $\lambda=778.5$  нм сумма фаз обращается в ноль (см. рис. 1а). В [4] установлено, что когда  $(\varphi_1+\varphi_2)\rightarrow 0$ , то характерная толщина разделительного слоя в интерферометре, при которой возникает резонансная локализованная мода в окрестности этого слоя, также стремится к нулю,  $l\rightarrow 0$  (см. рис. 1а). При уменьшении значения  $(\varphi_1+\varphi_2)$  от нуля до  $-\pi/2$ , толщина  $l$  монотонно увеличивается (см. рис. 1а). В докладе обсуждается возможность определения показателя преломления и толщины ультратонкой разделительной пленки из положения максимумов (минимумов) на кривой пропускания (на кривой зеркального отражения) интерферометра (рис. 1б). Результаты расчетов, показанные на рис.1, выполнены для интерферометра на основе многослойной фотонной структуры  $N\times(\text{ZnS}/\text{SrF}_2)$ , где  $N$  число слоев (подробности расчетов в [4]).

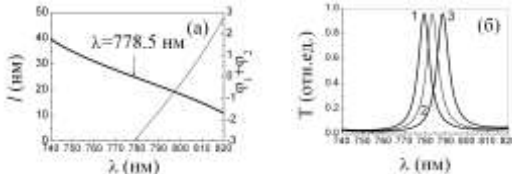


Рис. 1. Сумма фаз  $\varphi_1+\varphi_2$  (жирная кривая) и характерная толщина разделительного слоя  $l$  (тонкая кривая) в зависимости от длины волны,  $\lambda$ , падающего света в пределах фотонной запрещенной зоны (а), величина коэффициента пропускания,  $T$ , интерферометра в зависимости от  $\lambda$  (б), Толщина разделительного слоя:  $l=1$  нм (1); 5 нм (2); 10 нм (3)

#### Список литературы

1. Yablonovitch E. // Phys. Rev. Lett. 1987. V.58. P.2059.
2. John S. // Phys. Rev. Lett. 1987. V.58. P.2486.
3. Born M., Wolf E. Principles of optics, fourth ed. Pergamon Press, Oxford, 1965.
4. Prudnikov I.R. // Physica B. 2016. 481. P.172.

И.С. КРЮКОВА, И.Л. МАРТЫНОВ, Д.С. ДОВЖЕНКО,  
А.А. ЧИСТЯКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
ГИБРИДНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ОДНОМЕРНОГО  
ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА С ВНЕДРЕННЫМИ  
ЛЮМИНОФОРАМИ МЕТОДОМ FDTD**

В данной работе исследовались оптические свойства одномерных фотонных кристаллов с помещенными в них люминофорами методом конечных разностей во временной области. При моделировании было показано сужение спектра люминесценции люминофоров, внедренных в полость одномерного микрорезонатора. Продемонстрирована характерная зависимость добротности микрорезонатора от числа слоев в формирующих его брэгговских зеркалах.

I.S. KRYUKOVA, I.L. MARTYNOV, D.S. DOVZHENKO,  
A.A. CHISTYAKOV

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

**MODELING OF OPTICAL PROPERTIES OF HYBRID  
STRUCTURES BASED ON LUMINOPHORES EMBEDDED  
INTO ONE-DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTAL  
USING FDTD METHOD**

In this work optical properties of one-dimensional photonic crystals with the embedded luminophores have been investigated using finite-difference time-domain method. In the simulation narrowing of a luminescence spectrum of the luminophores embedded in a cavity of the one-dimensional microcavity has been demonstrated. Characteristic dependence of microcavity Q-factor on the number of its Bragg mirror layers has been studied.

В настоящее время гибридные системы на основе фотонных кристаллов с внедренными люминофорами представляют особенный интерес в области создания сенсоров, работающих как в газовой, так и в жидкой фазе [1]. Для повышения их чувствительности требуется возможность теоретического расчета зависимости оптических свойств данных гибридных систем от их структурных параметров: распределения люминофоров и морфологии фотонных кристаллов. В данной работе проводилось численное моделирование оптических свойств гибридных



структур, представляющих собой одномерный микрорезонатор с внедренным люминофором, методом конечных разностей во временной области (FDTD). Проведенные расчеты позволили получить зависимость спектров люминесценции от добротности микрорезонатора и глубины проникновения люминофора в структуру, а также оценить влияние морфологии фотонного кристалла на его оптические свойства. Зависимость добротности микрорезонатора от числа слоев в формирующем его Брэгговском зеркале представлена на рис. 1. Эта работа была поддержана Министерством образования и Науки Российской Федерации грант № 14.616.21.0042 ID RFMEFI61615X0042.

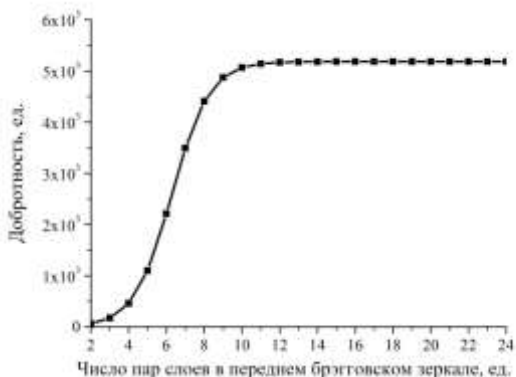


Рис. 1. Зависимость добротности микрорезонатора от числа пар слоев в его переднем брэгговском зеркале

#### *Список литературы*

1. Котковский Г.Е. и др. Фотофизические свойства пористого кремния и его применение в технике и биомедицине // Ядерная физика и инжиниринг. 2013. Т.4. №2. С.174-192.

А.В. КОРЮКИН<sup>1,2</sup>, М.Х. САЛАХОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Казанский федеральный университет, Казань*

<sup>2</sup>*Институт перспективных исследований АН Республики Татарстан, Казань*

## **ПРОПУСКАНИЕ ГИБРИДНЫХ ФОТОН-ПЛАЗМОННЫХ КРИСТАЛЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ САМОСБОРКИ**

На данный момент опалоподобные гибридные фотон-плазмонные кристаллы, полученные методом самосборки, являются перспективным материалом для фотоники. С помощью спектrophотометрии были обнаружены плазмонные моды и экстраординарное пропускание.

A.V. KORYUKIN<sup>1,2</sup>, M.Kh. SALAKHOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Kazan Federal University*

<sup>2</sup>*Institute of Perspective Researches of Tatarstan Academy of Sciences, Kazan*

## **TRANSMISSION THROUGH SELF-ASSEMBLED HYBRID SELF-ASSEMBLED PHOTONIC-PLASMONIC CRYSTALS**

Opal-like self-assembled photonic-plasmonic crystals is perspective materials for photonics. Plasmonic-like modes as well as extraordinary transmissions on spectra in visible range were detected.

В последние годы большое внимание уделяется гибридным материалам – фотон-плазмонным кристаллам (ФПК). Такие металл-диэлектрические структуры (где диэлектрик – фотонный кристалл) позволяют плазмонные (поле сконцентрировано близко к металлу) и фотонные (поле распределено в пределах диэлектрика) моды. Основная задача ФПК – усилить конфаимент поля фотонного кристалла (ФК) для того, чтобы увеличивалось расстояние распространения поверхностных плазмонов [1]. Одно из актуальных применений – спазеры (плазмонный лазер) [2], когда в качестве активной среды выступает квантовая точка, помещенная в область ограниченную ФПК. В 2013 году были рассмотрены лазеры и на таммовских плазмонах (возникающих в интерфейсе металл-ФК) [3]. В данной работе анализируются спектры пропускания опалоподобных гибридных фотон-плазмонных кристаллов, полученных методом самосборки. Приводится сравнение спектров гибридной структуры в зависимости от угла и наблюдается экстраординарное пропускание.

ФПК на основе опалоподобного ФК, который исследуется в нашей работе, был получен методом самосборки из коллоидных частиц диоксида кремния. Диаметр частиц ФК  $334 \pm 5$  нм, толщина ФК –  $3,6 \pm 0,2$  мкм, количество слоев ФК – 12. Эти параметры были определены с помощью атомно-силовой микроскопии и спектроскопии. Толщина слоя золота – около 50 нм.

Спектры регистрировались с помощью УФ-ВИД спектрофотометра Lambda-35 (Perkin Elmer). Для детального изучения плазмонных мод был рассмотрен спектр ФПК, нормализованный к ФК. На таком спектре, как показано на рис. 1, можно заметить 3 пика пропускания, соответствующие плазмонным модам (пики около 350, 500 и 700 нм). Так же можно заметить на рис. 1 один из признаков ФПК – экстраординарное пропускание – пик около 400 нм.

В результате исследования опалоподобных гибридных фотон-плазмонных кристаллов были обнаружены плазмонные моды и экстраординарное пропускание [4, 5].

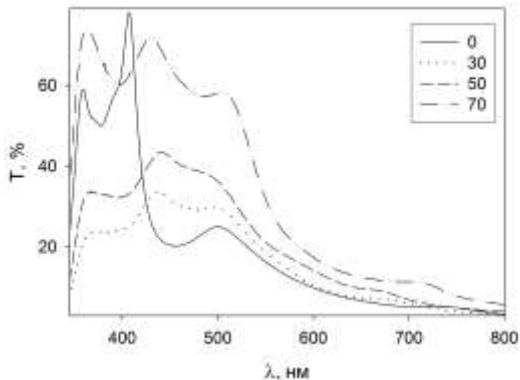


Рис. 1. Спектры пропускания ФПК, нормированные к спектру ФК, при разных углах

#### Список литературы

1. Lopez-Garcia M. // Xullo. 2011. P.185.
2. Oulton R., Sorger V., Zentgraf T., Ma R., Gladden C., Dai L., Bartal G., Zhang X. // Nature. 2009. V.461. P.629-632.
3. Symonds C., Lheureux G., Hugonin J.P., Greffet J.J., Lavedant J., Brucoli G., Lemaitre A., Senellart P., Bellessa J. // Nano Lett. 2013. V.13. P.3179–3184.
4. Wang Z.-B., Ye Y.-H., Zhang Y.-A., Zhang J.-Y. // Appl. Phys. A. 2009. V.97. P.225-228.
5. Ding B., Pemble M.E., Korovin A.V., Peschel U., Romanov S.G. // Phys. Rev. B. 2010. V.82. P.035119.

А.М. ВЬЮНЫШЕВ<sup>1,2</sup>, Р.Г. БИКБАЕВ<sup>2</sup>, П.С. ПАНКИН<sup>2</sup>,  
С.Е. СВЯХОВСКИЙ<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>*Сибирский федеральный университет, Красноярск*

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

## ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛОС ПРОПУСКАНИЯ В КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ

Описывается метод суперпозиции модуляции показателя преломления для расчета структуры нового типа квазипериодических фотонных кристаллов (КПФК). Спектры пропускания предложенных КПФК характеризуются набором фотонных запрещенных зон, положение которых варьируется путем выбора соответствующих значений пространственных частот.

A.M. VYUNISHEV<sup>1,2</sup>, R.G. BIKBAEV<sup>2</sup>, P.S. PANKIN<sup>2</sup>,  
S.E. SVYAKHOVSKIY<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>*Siberian Federal University, Krasnoyarsk*

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

## BAND FORMATION IN QUASIPERIODIC PHOTONIC CRYSTALS

Method of superposition of refractive index modulation is described to calculate the structure of a new type of quasiperiodic photonic crystals (QPPC). Transmission spectra of QPPC are characterized by a set of photonic band gaps, whose positions vary by selecting the values of appropriate spatial frequencies.

Квазипериодические фотонные кристаллы (КПФК) представляют собой слоистые структуры с непериодическим распределением показателя преломления в пространстве, которое подчиняется наперед заданному правилу. На основе КПФК были предложены идеальные поглотители, всенаправленные отражатели, оптические фильтры [1-3].

В данной работе предложен метод суперпозиции модуляции показателя преломления для структурирования КПФК. В этом случае функция модуляции показателя преломления может быть представлена в виде

$$n(z) = n_0 + \Delta n \operatorname{sign}(a_1 \sin(2\pi G_1 z) + a_2 \sin(2\pi G_2 z)). \quad (1)$$

Здесь  $n_0$  - среднее значение показателя преломления,  $\Delta n$  - максимальное отклонение величины показателя преломления от  $n_0$ ,  $a_j$  и  $G_j$  -

относительная амплитуда и пространственная частота  $j$ -й компоненты. Данный метод является аналогом метода «суперпозиции модуляции нелинейности», предложенного в работе [4]. В качестве чередующихся слоев структуры были выбраны слои пористого кремния, из-за возможности формирования оптически-прозрачных многослойных структур с большим числом слоёв и распределением (1) показателя преломления (ПП) [5]. Для расчета спектра пропускания методом трансфер-матрицы были взяты параметры  $G_1=5 \text{ мкм}^{-1}$ ,  $G_2=3.3 \text{ мкм}^{-1}$ . ПП слоев были рассчитаны по формуле Бруггемана для значений пористости 10% и 50%. Общая толщина образца равна 4 мкм. На кривой пропускания появляются две зоны, соответствующие различным пространственным частотам (рис. 1). Изменяя значения векторов обратной решетки можно управлять кривыми пропускания. В частности, можно получить П-образную область пропускания с произвольной шириной в заданном спектральном диапазоне (рис. 2). Это дает простой способ настройки структуры при создании оптических фильтров.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ Сибирскому федеральному университету на выполнение НИР в 2017 году (рег. № 3.1211.2017/ПЧ), а также при поддержке РФФИ и Правительства Красноярского края (№16-42-243065).

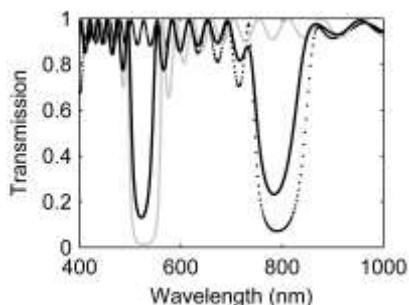


Рис. 1. Коэффициент пропускания структуры при  $a_1=0$ ,  $a_2=1$  (маркеры),  $a_1=1$ ,  $a_2=0$  (серый),  $a_1=1$ ,  $a_2=1$  (черный)

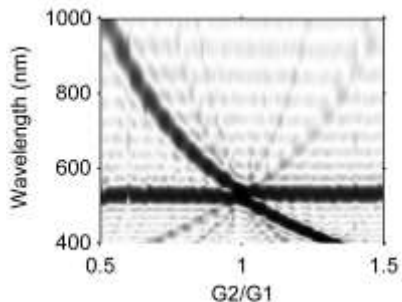


Рис. 2. Коэффициент пропускания структуры в зависимости от значения  $G_2$  при фиксированном значении  $G_1$

#### Список литературы

1. Gong Y., et. al. // Optics express. 2011. V.19(10). P.9759.
2. Lusk D., et. al. // Optics communications. 2001. V.198. P.273.
3. Vasconcelos M.S., et. al. // Microelectronics Journal. 2009. V.40. P.851.
4. Новиков А.А., Чиркин А.С. // ЖЭТФ. 2008. V.133. P.483.
5. Svyakhovskiy S.E., et al. // J. Appl. Phys. 2012. V.112. P.013106.

А.В. ИНЮШОВ, И.А. ТРУШНИКОВ, П.К. САФРОНОВА,  
А. САРКЫТ, В.М. ШАНДАРОВ

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники*

## **ОПТИЧЕСКОЕ ИНДУЦИРОВАНИЕ ОДНОМЕРНЫХ ФОТОННЫХ СТРУКТУР С БЕССЕЛЕПОДОБНЫМ ПРОФИЛЕМ В НИОБАТЕ ЛИТИЯ**

Продемонстрировано формирование одномерных бесселеподобных лазерных пучков оптическими схемами с амплитудными транспарантами. Полученные световые поля использованы для создания одномерных фотонных структур в кристаллических образцах ниобата лития с фоторефрактивными свойствами.

A.V. INYUSHOV, I.A. TRUSHNIKOV, P.K. SAFRONOVA,  
A. SARKYT, V.M. SHANDAROV

*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*

## **OPTICAL GENERATION OF ONE-DIMENSIONAL PHOTONIC STRUCTURES WITH BESSEL-LIKE PROFILE IN LITHIUM NIOBATE**

Formation of one-dimensional Bessel-like beams has been demonstrated using optical schemes with amplitude masks. The obtained light fields have been used to form one-dimensional photonic structures within photorefractive lithium niobate crystal samples.

В настоящее время проявляется повышенный интерес к “бездифракционным” световым полям, к которым относятся пучки Эйри, Бесселя и некоторые другие [1, 2]. Целью данной работы явилось формирование одномерных бесселеподобных световых пучков с помощью амплитудных транспарантов, а также их использование для создания фотонных структур в фоторефрактивных кристаллических образцах ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ).

Источником излучения в экспериментах служил твердотельный лазер  $\text{YAG:Nd}^{3+}$  с длиной волны излучения  $\lambda=532$  нм. Его излучение освещает экран с двумя прямоугольными щелями, расположенный в фокальной плоскости цилиндрической линзы. Распределение интенсивности в интерференционной картине исследуется с помощью анализатора лазерных пучков. Полученные одномерные бесселеподобные пучки

использованы для формирования фоторефрактивных фазовых структур в образце  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$  с размерами  $10 \times 2 \times 15 \text{ мм}^3$  по осям X, Y и Z.

Картина светового поля вблизи фокальной плоскости линзы с фокусным расстоянием 19 см, с характерным для бесселеподобных пучков распределением интенсивности, показана на рис. 1. Картина на рис. 2 иллюстрирует ближнюю зону дифракции лазерного излучения ( $\lambda=532\text{нм}$ ) на одномерной фазовой решетке с пространственным периодом 180 мкм, сформированной при оптической мощности 1мВт и времени экспонирования 3 мин.

Фотонные структуры с пространственными периодами 20 – 30 мкм сформированы также в кристаллических образцах  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ , размер которых в направлении распространения света составлял от 5 до 10 мм. В данных структурах изучены особенности дискретной дифракции света [3, 4], связанные с малым числом элементов и различием их параметров.

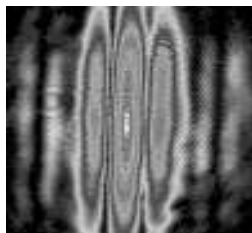


Рис. 1. Световое поле одномерного бесселеподобного пучка

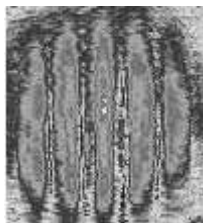


Рис. 2. Картина светового поля на выходной плоскости пластины  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$

Работа выполнена в рамках проектной части Госзадания Минобрнауки РФ (проект №3.878.2014/К).

#### *Список литературы*

1. Duocastella M.A., Craig B. Bessel and annular beams for materials processing // *Laser Photonics Rev.* 2012. 6. P.607-621.
2. Siviloglou G.A., Christodoulides D.N. Accelerating finite energy Airy beams // *Opt. Lett.* 2007. 32. P.979-981.
3. Christodoulides D.N., Lederer F., Silberberg Y. Discretizing light behaviour in linear and nonlinear waveguide lattices // *Nature.* 2003. 424. P.817-823.
4. Diebel F., Boguslawski M., Dadalyan T., Drampyan R., Denz C. Controlled soliton formation in tailored Bessel photonic lattices // *Optics Express.* 2016. 24. P.12933-12940.

**Н.А. ТЕПЛЯКОВА, Н.В. СИДОРОВ, М.Н. ПАЛАТНИКОВ**

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

## **ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛА LiNbO<sub>3</sub>:Fe(0.02):Zn(4.34) мол. %**

Методами фотоиндуцированного рассеяния света и лазерной коноскопии исследован монокристалл LiNbO<sub>3</sub>:Fe(0.02):Zn(4.34) мол.%. Установлено, что присутствие «фоторефрактивных» катионов Fe не оказывает столь существенного влияния на эффект фоторефракции, как в кристаллах конгруэнтного состава, легированных Fe.

**N.A. TEPLYAKOVA, N.V. SIDOROV, M.N. PALATNIKOV**

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

## **OPTICAL PROPERTIES OF THE CRYSTAL LiNbO<sub>3</sub>:Fe(0.02):Zn(4.34) mol. %**

The crystal LiNbO<sub>3</sub>:Fe(0.02):Zn(4.34) mol.% was researched by photoinduced light scattering and laser conoscopy. "Photorefractive" cations Fe were detected to pay little effect on photorefractive effect despite the congruent crystals doped only by Fe.

Методами лазерной коноскопии и фотоиндуцированного (фоторефрактивного) рассеяния света (ФИРС) исследованы оптическая однородность и фоторефрактивные свойства монокристалла LiNbO<sub>3</sub>:Fe(0.02):Zn(4.34) мол.%, выращенного из расплава конгруэнтного состава. ФИРС является следствием фоторефрактивного эффекта и происходит в сегнетоэлектрическом кристалле на статических и динамических (флуктуирующих) микронеоднородностях структуры, наведенных лазерным излучением. Особенности спекл-структуры индикатрисы ФИРС определяются тонкими особенностями структуры кристалла, наличием в ней многозарядных «фоторефрактивных» катионов и дефектов с локализованными электронами. ФИРС обуславливает сильную деструкцию лазерного луча в кристалле и является мешающим фактором для генерации и преобразования излучения. Поэтому важной практической задачей является получение монокристаллов LiNbO<sub>3</sub>, отличающихся низким ФИРС. Такие кристаллы отличаются также повышенной лучевой прочностью.



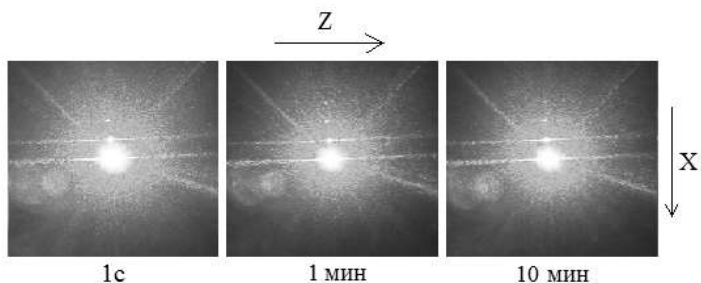


Рис. 1. Фотоиндуцированное рассеяние света в кристалле  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}(0.02):\text{Zn}(4.34)$  мол.%.  $\lambda_0=532$  нм,  $P=160$  мВт

Как это следует из полученных нами данных по ФИРС (рис. 1), наличие в кристалле  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}(0.02):\text{Zn}(4.34)$  мол.% «фоторефрактивных» катионов железа не приводит к существенному увеличению эффекта фоторефракции. Из рис. 1 видно также, что в кристалле  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}(0.02):\text{Zn}(4.34)$  мол.% даже при сравнительно высокой мощности лазерного излучения (160 мВт) картина ФИРС со временем не раскрывается и постоянно присутствует только незначительное круговое рассеяние, свидетельствующее о малости эффекта фоторефракции. Подавление ФИРС с сохранением фоторефрактивных свойств монокристалла является необходимым условием успешного использования кристалла в голографии.

При исследовании кристалла  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}(0.02):\text{Zn}(4.34)$  мол.% методом лазерной коноскопии было обнаружено, что коноскопические картины, полученные как при малой (1 мВт), так и при большой (90 мВт) мощности лазерного излучения, практически соответствуют стандартным коноскопическим картинам одноосного кристалла. Имеются незначительные аномалии на периферии коноскопических картин, что может быть обусловлено некоторой оптической неоднородностью кристалла  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}(0.02):\text{Zn}(4.34)$  мол.%, очевидно вследствие неравномерного вхождения примесей в структуру кристалла при его выращивании.

Методы лазерной коноскопии и ФИРС не дают информации об особенностях внутренней структуры кристаллов и дефектов, определяющих их фоторефрактивные свойства, однако позволяют получить предварительную информацию об оптической однородности и фоторефрактивных свойствах кристаллов, что важно на этапе отработки технологии выращивания кристаллов ниобата лития.

А.В. СЮЙ, Е.О. КИЛЕ, Н.Н. ПРОКОПИВ,  
Н.В. СИДОРОВ<sup>1</sup>, М.Н. ПАЛАТНИКОВ<sup>1</sup>

*Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск  
<sup>1</sup>Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья  
им. И.В. Тананаева Кольского научного центра РАН, Апатиты, Мурманская обл.*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОРОДНОСТИ КРИСТАЛЛОВ НИОБАТА ЛИТИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННО- ПОЛЯРИЗАЦИОННЫМ МЕТОДОМ**

Интерференционно-поляризационным методом исследована однородность кристаллов ниобата лития с геометрическими размерами 14×14×11 мм вдоль кристаллофизических осей x,y,z соответственно. Определены значения электрооптических коэффициентов  $r_{22}$ ,  $r_{13}$ ,  $r_{33}$  по всей апертуре входной грани кристалла.

A. V. SYUY, E. O. KILE, N. N. PROKOPIV,  
N. V. SIDOROV<sup>1</sup>, M. N. PALATNIKOV<sup>1</sup>

*Far Eastern State Transport University, Khabarovsk  
<sup>1</sup>I. V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral  
Raw Materials of Kola Science Center of the RAS, Apatity, Murmansk region*

## **STUDY OF HOMOGENEOUS LITHIUM NIOBATE CRYSTAL BY INTERFERENCE-POLARIZATION METHOD**

Interference-polarization method investigated the homogeneity of lithium niobate crystals with geometric dimensions of 14×14×11 mm along the crystallographic axes x, y, z, respectively. The values of electro-optic coefficients  $r_{22}$ ,  $r_{13}$ ,  $r_{33}$  for the entire aperture of the input face of the crystal are determined.

Кристаллы ниобата лития широко используются в нелинейной оптике, акустооптике, в оптическом приборостроении [1-3]. На базе кристаллов ниобата лития изготавливают различные датчики и приборы для генерации гармоник, модуляции излучения, обработки, передачи и хранения оптической информации [4, 5]. Для изготовления широкоапертурного модулятора, обработки изображения с помощью такого модулятора необходимо иметь достаточно однородный кристалл по всей апертуре входной грани кристалла. Изготовление кристалла с однородной структурой по всему объему образца является одной из фундаментальных задач оптического материаловедения.

Целью данной работы является определение электрооптических коэффициентов по всей апертуре входной грани кристалла ниобата лития интерференционно-поляризационным методом. На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки. Для определения электрооптических коэффициентов используется поперечный электрооптический эффект, изменяется только геометрия эксперимента (излучение направляется вдоль оси  $x$  или  $z$ ). Анализатор исключает поочередно параллельную и перпендикулярную составляющие вектора напряженности электрического поля световой волны, прошедшей через кристалл. Электрическое напряжение прикладывается к граням кристалла от нуля до поволюнового значения.

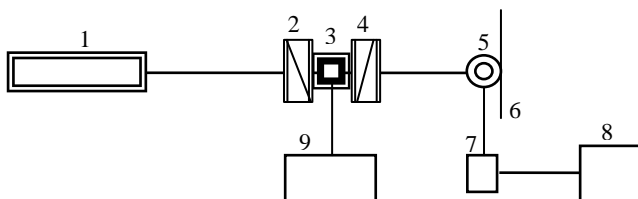


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 - гелий-неоновый лазер ГН-5 с длиной волны 632,8 нм; 2 - поляризатор; 3 - кристалл; 4 - анализатор; 5 - фотодиод ФД-24К, 6 - экран; 7 - мультиметр АКТАКОМ АМ-1097, 8 - компьютер; 9 - генератор высоковольтного напряжения

Используя зависимость относительной интенсивности прошедшего через кристалл излучения от прикладываемого электрического напряжения и геометрические размеры образца, определены электрооптических коэффициентов  $r_{22}$ ,  $r_{13}$ ,  $r_{33}$  по всей апертуре входной грани кристалла с шагом 2 мм. Оказалось, что значения электрооптических коэффициентов по апертуре входной грани кристалла отклоняются до 10 % от среднего значения.

#### *Список литературы*

1. Guenter P., Huignard J.-P. Photorefractive Materials and Their Applications 2. New York: Springer, 2007.
2. Volk T., Wohlecke M. Lithium niobate. Defects, photorefracton and ferroelectric switching. Berlin: Springer, 2008.
3. Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. СПб.: Наука, 1992.
4. Мустель Е.Р., Парыгин В.Н. Методы модуляции и сканирования света. М.: Наука, 1970.
5. Блистанов А.А. Кристаллы квантовой и нелинейной оптики. М.: МИСИС, 2000.

А.О. ВЕРХОТУРОВ, В.М. ШАНДАРОВ

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники*

**ОПТИЧЕСКОЕ ФОРМИРОВАНИЕ  
ДИФРАКЦИОННЫХ СТРУКТУР В НИОБАТЕ ЛИТИЯ  
С ФОТОРЕФРАКТИВНЫМ ПОВЕРХНОСТНЫМ СЛОЕМ**

Обсуждаются результаты формирования дифракционных структур путем оптического индуцирования в легированных фоторефрактивными примесями (Fe и Cu) приповерхностных слоях ниобата лития лазерным излучением с длинами волн 450 и 532 нм.

A.O. VERKHOTUROV, V.M. SHANDAROV

*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*

**OPTICAL FORMATION OF DIFFRACTION STRUCTURES  
IN LITHIUM NIOBATE  
WITH PHOTOREFRACTIVE SURFACE LAYER**

Results of formation of diffraction structures by means of their optical inducing by laser radiation with wavelengths of 450 and 532 nm in surface layers of lithium niobate doped with photorefractive impurities (Fe and Cu) are discussed.

Кристаллические образцы ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ), легированные некоторыми примесями, например, железом (Fe) и медью (Cu), обладают фоторефрактивными свойствами [1]. Благодаря этому в подобных образцах можно формировать дифракционные решетки и более сложные голографические структуры лазерным излучением [2].

Целью данной работы является исследование формирования и характеристик дифракционных структур в образцах  $\text{LiNbO}_3$  с легированием поверхностной области фоторефрактивными примесями.

В качестве источников излучения использовались полупроводниковый лазер ( $\lambda=450$  нм) и YAG:Nd<sup>3+</sup> лазер ( $\lambda=532$  нм). Оптическая мощность на этапе формирования структур составляла 10 мВт. Кристаллический образец Y среза имел размеры  $8 \times 2 \times 17$  мм<sup>3</sup> по осям X, Y, Z. Дифракционные структуры формировались с помощью одномерного амплитудного транспаранта (АМ), размещаемого непосредственно у легированной поверхности кристаллического образца [3]. Пространственный период сформированных структур составлял в разных

экспериментах от 8 до 40 мкм. Кинетика формирования структур изучалась по истощению интенсивности прошедшего через АМ излучения и изменениям интенсивностей дифракционных максимумов разных порядков. Сформированные фазовые дифракционные структуры исследовались путем дифракции необыкновенно поляризованного лазерного излучения с длинами волн 532 и 633 нм. Получены и изучались световые картины в ближней и дальней зонах дифракции.

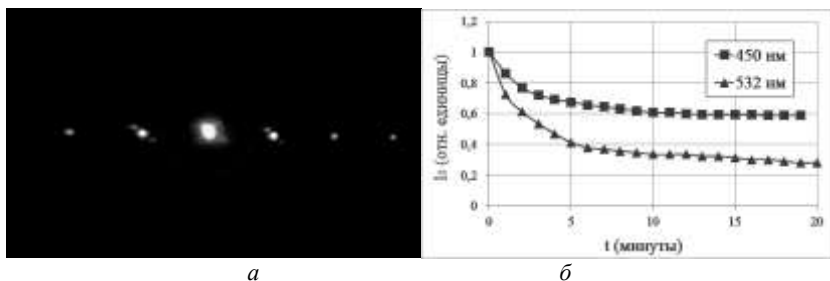


Рис. 1. Световая картина в дальней зоне дифракции при  $\lambda=633$  нм, пространственном периоде решетки 18 мкм и ориентации вектора решетки параллельно оптической оси кристалла (а); временные зависимости истощения интенсивности прошедшего света (б)

Рис. 1а иллюстрирует типичную дифракционную картину в дальней зоне при распространении света по нормали к плоскости планарной решетки. Рис. 1б иллюстрирует истощение интенсивности прошедшего света при оптической мощности 10 мВт и диаметре формирующего пучка 1.1 мм. Изменение показателя преломления в области полученной решетки оценивалось по отношению интенсивностей дифракционных максимумов разного порядка. Для необыкновенной волны его оценка составила  $\sim 0.0015$ .

Таким образом, экспериментально продемонстрировано формирование дифракционных структур в фоторефрактивном поверхностном слое образцов ниобата лития, что может использоваться при создании компонентов и приборов фотоники.

Работа выполнена в рамках проектной части Госзадания Минобрнауки РФ (проект №3.878.2014/К).

#### Список литературы

1. Petrov M.P., Stepanov S.I., Khomenko A.V. // Berlin: Springer-Verlag. 1991.
2. Тренихин П.А., Шандарова К.В., Шандаров В.М. // Доклады ТУСУР. 2010. 22. С.84-87.
3. Trenikhin P.A., Shandarov V.M., Chen F. // PWO. 2010. V.18. P.1-6.

Д.В. МАНУКОВСКАЯ, Н.В. СИДОРОВ, М.Н. ПАЛАТНИКОВ

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

## **ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КАРТИН ФОТОИНДУЦИРОВАННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА МОНОКРИСТАЛЛОВ НИОБАТА ЛИТИЯ С НИЗКИМ ЭФФЕКТОМ ФОТОРЕФРАКЦИИ**

В монокристаллах ниобата лития вследствие эффекта фоторефракции под действием лазерного излучения видимой длины волны возникают лазерно-индуцированные дефекты. Рассеяние света на этих дефектах интерферирует с накачкой, формируя картины фотоиндуцированного рассеяния света (ФИРС). ФИРС многослойно и несет информацию о процессах генерации, дрейфа и диффузии лазерно-индуцированных дефектов. В данной работе разработан алгоритм выделения слоев из цветных картин ФИРС, а также проведено сравнение фрактального анализа картин ФИРС для стехиометрических кристаллов, выращенных по различным технологиям и для конгруэнтных кристаллов, легированных цинком в низких концентрациях (0.018-0.88 масс.% ZnO). Обнаружено, что способ выращивания стехиометрических кристаллов влияет на их механизм проводимости. Выявлен конгруэнтный кристалл  $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$  [0.62 мас.%], упорядоченность катионной подрешетки которого приближается к таковой стехиометрического кристалла.

D.V. MANUKOVSKAYA, N.V. SIDOROV, M.N. PALATNIKOV

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

## **FRACTAL ANALYSIS OF PHOTOINDUCED LIGHT SCATTERING PICTURES IN LITHIUM NIOBATE CRYSTALS WITH LOW PHOTOREFRACTIVE EFFECT**

Lithium niobate single crystals generate photoinduced defects under visible laser radiation due to the photorefractive effect. Light scattered on the defects interfere with the pump and form photoinduced light scattering (PILS) pictures. PILS is many-layered and it carries important information about generation, migration and diffusion of laser-induced defects. This paper is dedicated to development of an algorithm for splitting of colored PILS pictures into layers. Comparison was carried out for fractal analysis of PILS layers of stoichiometric lithium niobate crystals grown due to different methods and of congruent lithium niobate crystals doped by small amounts of zinc (0.018-0.88 wt.% ZnO). Growth method was discovered to affect the conductivity mechanism of

stoichiometric lithium niobate crystals. A congruent crystal  $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$  [0.62 wt.%] was detected to have structure order close to the one of stoichiometric crystal.

Два кристалла ниобата лития стехиометрического состава были выращены по различным технологиям: с избытком лития в расплаве и из конгруэнтного расплава с щелочным флюсом  $\text{K}_2\text{O}$ .

С помощью анализа временной динамики фрактальной размерности слоев фотоиндуцированного рассеяния света (ФИРС) этих двух стехиометрических кристаллов выявлено, что способ выращивания определяет их структуру и, соответственно, тип проводимости. Для кристаллов, выращенных по обычной технологии, характерна более быстрая прыжковая электронная проводимость, для выращенных с щелочным флюсом – более медленная поляронная. Объясняется это более высокой дефектностью структуры кристалла, выращенного из расплава с  $\text{K}_2\text{O}$ .

Среди конгруэнтных кристаллов ниобата лития, легированных цинком в малых концентрациях был выявлен образец  $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$  [0.62 мас.%], для которого временная динамика фрактальной размерности слоев ФИРС была идентична динамике стехиометрического кристалла. Так как стехиометрический кристалл отличается наиболее упорядоченной катионной подрешеткой [1], то похожесть откликов системы лазерно-индуцированных дефектов, на которых происходит ФИРС, свидетельствует о похожести дефектности, следовательно, упорядоченности катионной подрешетки кристаллов. Таким образом, кристалл  $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$  [0.62 мас.%] обладает упорядоченностью катионной подрешетки, приближенной к стехиометрическому кристаллу. Объясняется это тем, что  $\text{Zn}^{2+}$  вытесняет собственный дефект  $\text{Nb}_{\text{Li}}^{4+}$  (ниобий в литиевой позиции), чем уменьшает количество компенсирующих литиевых вакансий [2]. При этом чередование катионов лития, ниобия, цинка и вакантных октаэдров вдоль полярной оси упорядочивается, приближаясь к упорядочению катионной подрешетки стехиометрического кристалла.

#### *Список литературы*

1. Сидоров Н.В., Волк Т.Р., Маврин Б.Н., Калинин Т. Ниобат лития: дефекты, фоторефракция, колебательный спектр, поляритоны. М.: Наука, 2003.
2. Сидоров Н.В., Яничев А.А., Палатников М.Н., Габаин А.А. Эффекты упорядочения структурных единиц катионной подрешетки кристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$  и их проявление в спектре комбинационного рассеяния света // Оптика и спектроскопия. 2014. Т.116. №2. С.306-315.

М.Н. ЛИТВИНОВА, В.А. ПОГОДИНА, А.В. СЮЙ,  
В.В. КРИШТОП, Н.В. СИДОРОВ<sup>1</sup>, М.Н. ПАЛАТНИКОВ<sup>1</sup>  
*Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск*  
<sup>1</sup>*Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья*  
*им. И.В. Тананаева Кольского научного центра РАН, Апатиты, Мурманская обл.*

## **ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОГО ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ И СТРУКТУРНЫЙ БЕСПОРЯДОК В КРИСТАЛЛАХ $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$**

В работе исследовались процессы преобразования широкополосного ИК-излучения в легированных цинком кристаллах ниобата лития  $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$  ( $[\text{Zn}] = 0.02 - 3.0$  вес.%). Получены концентрационные зависимости параметров спектров преобразованного излучения.

M.N. LITVINOVA, V.A. POGODINA, A.V. SYUY,  
V.V. KRISHTOP, N.V. SIDOROV<sup>1</sup>, M.N. PALATNIKOV<sup>1</sup>  
*Far Eastern State Transport University, Khabarovsk*  
<sup>1</sup>*I.V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral*  
*Raw Materials of Kola Science Center of the RAS, Apatity, Murmansk region*

## **CONVERSION OF BROADBAND INFRARED RADIATION AND THE STRUCTURAL DISORDER IN Zn DOPED LITHIUM NIOBATE CRYSTALS**

The processes of conversion of the broadband infrared radiation in zinc doped lithium niobate crystals  $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$  ( $[\text{Zn}] = 0.02 - 3.0$  вес.%) have been investigated. The concentration dependences of the parameters of the converted radiation spectra were obtained.

Известно, что легирование кристаллов ниобата лития малыми концентрациями нефоторефрактивных примесей позволяет повысить степень структурного упорядочения катионной подрешетки кристаллов вдоль полярной оси и снизить их фоторефрактивную чувствительность [1].

В данной работе исследованы легированные кристаллы  $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$  с содержанием цинка  $[\text{Zn}] = 0.02; 0.03; 0.52; 0.62; 0.88; 2.0; 2.05$  и  $2.86$  вес.%. Монокристаллы конгруэнтного состава, легированные цинком Zn, имели форму параллелепипедов с ребрами, параллельными



кристаллофизическим осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$  соответственно. Ось  $z$  совпадала по направлению с полярной осью кристалла  $P_s$ .

Получены спектры широкополосного излучения, преобразованного в исследуемых кристаллах [1, 2]. Максимум спектров преобразованного излучения соответствует длине волны излучения второй гармоники и суммарных частот  $\lambda_0$  (частоте  $2\omega_0$ ), для которой выполняется условие 90-градусного фазового синхронизма  $n_e(2\omega_0) = n_o(\omega_0)$ , где  $n_e(2\omega_0)$  и  $n_o(\omega_0)$  – показатели преломления взаимодействующих волн на соответствующих частотах.

Концентрационные зависимости параметров спектров преобразованного излучения (длины волны 90-градусного фазового синхронизма  $\lambda_0$  и относительной интенсивности излучения второй гармоники и суммарных частот при  $\lambda_0$ ) показаны на рис. 1.

Изменение характера концентрационных зависимостей параметров спектра преобразованного излучения при определенных значениях концентрации цинка в кристалле возможно связано с изменением числа литиевых вакансий в кристалле и степени структурного упорядочения катионной подрешетки кристалла.

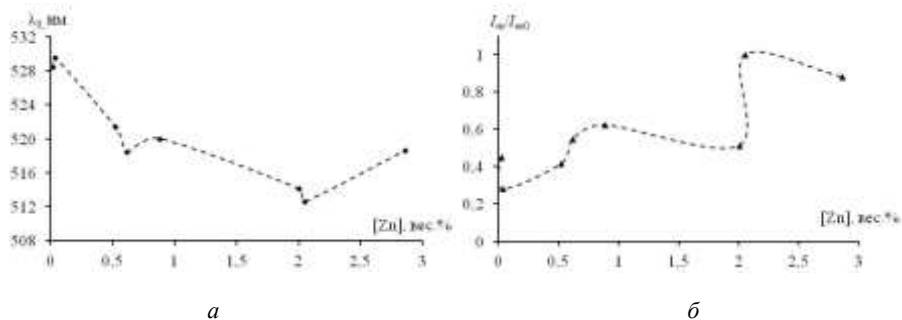


Рис. 1. Зависимости параметров спектра преобразованного излучения от содержания цинка в кристалле  $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$  для: длины волны 90-градусного синхронизма  $\lambda_0$  (а), относительная интенсивность излучения второй гармоники и суммарных частот при  $\lambda_0$ ;  $I_{w0} = I_m$  ( $[\text{Zn}] = 2.05$  вес.%) (б)

#### Список литературы

1. Сюй А.В., Литвинова М.Н., Гончарова П.С. и др. // ЖТФ. 2013. Т.83. №5. С.109-114.
2. Толстов Е.В., Криштоп В.В., Строганов В.И. и др. // Известия вузов. Приборостроение. 2004. №10. С.74-77.

А.В. ПУСТОЗЕРОВ, В.Ю. РЯБЧЁНОК, В.М. ШАНДАРОВ  
*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники*

## **ВЛИЯНИЕ НЕКОГЕРЕНТНОЙ ФОНОВОЙ ПОДСВЕТКИ НА ЗНАК НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКОГО ОТКЛИКА КРИСТАЛЛА НИОБАТА ЛИТИЯ**

Исследуется влияние некогерентного излучения светодиодов видимого диапазона на дифракционные характеристики монохроматических световых пучков в кристалле ниобата лития. Экспериментально продемонстрирована возможность обращения знака фоторефрактивного нелинейного отклика кристалла при воздействии коротковолнового фонового излучения.

A.V. PUSTOZEROV, V.Yu. RYABCHENOK, V.M. SHANDAROV  
*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*

## **AN INFLUENCE OF INCOHERENT BACKGROUND ILLUMINATION ON A SIGN OF NONLINEAR OPTICAL RESPONSE OF A LITHIUM NIOBATE CRYSTAL**

The influence of incoherent emission of light-emitting diodes of visible range on diffraction characteristics of monochromatic light beams in lithium niobate crystal is investigated. Possible inversion of photorefractive nonlinear response sign of a crystal at the short-wavelength background illumination has been experimentally demonstrated.

В нелинейных оптических средах распространение света сопровождается эффектами самовоздействия. В фоторефрактивных кристаллах, к которым относится ниобат лития ( $\text{LiNbO}_3$ ), эти эффекты наблюдаются и при микроваттных световых мощностях. В  $\text{LiNbO}_3$  с фотовольтаическим механизмом переноса нелинейный отклик является самодефокусирующим [1]. Однако такой отклик может быть обусловлен и другими механизмами [2, 3]. Целью работы является экспериментальная демонстрация влияния некогерентной фоновой подсветки с различными центральными длинами волн на величину и знак фоторефрактивного нелинейного отклика  $\text{LiNbO}_3$  на длине волны света 633 нм. На рис. 1 приведена схема эксперимента, в котором наблюдается сдвиг максимумов интерференционной картины, формируемой отраженными от передней и задней поверхностей образца, при воздействии излучения светодиодов с центральными длинами волн 400, 465 и 525 нм. Образец  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  (0.005 вес. %) имеет размеры  $10 \times 5 \times 10 \text{ мм}^3$  вдоль осей X, Y и Z.

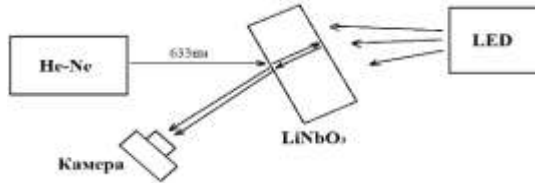


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

На рис. 2 показаны интерференционные картины и профили их интенсивности в направлении, параллельном оси  $Z$  кристалла, при центральной длине волны некогерентного излучения 465 нм, в начальный момент и через 60 минут после включения подсветки. Сдвиг интерференционной картины обусловлен изменением показателя преломления материала вследствие фотовольтаического поля, наведенного в кристалле при воздействии фоновой подсветки.

Исследованы также изменения дифракционной расходимости световых пучков с  $\lambda=633$  нм и диаметрами 20 – 30 нм при воздействии некогерентного излучения с  $\lambda=465$  нм. Экспериментально показано, что наличие нефокусированного излучения подсветки позволяет на  $\sim 20\%$  уменьшить вклад нелинейной дифракции в дифракционную расходимость монохроматического светового пучка ( $\lambda=633$  нм).

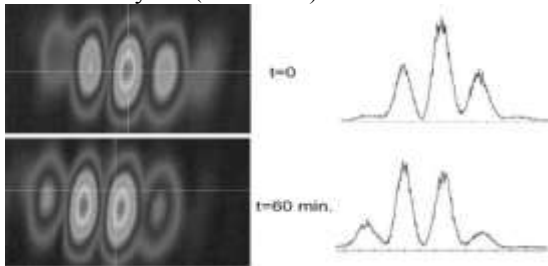


Рис. 2. Световые картины и профили распределения интенсивности при интерференции пучков ( $\lambda=633$  нм), отраженных от передней и задней поверхностей кристалла при центральной длине волны подсветки 465 нм

#### Список литературы

1. Kip D. Photorefractive waveguides in oxide crystals: fabrication, properties, and applications // Appl. Phys. B. 1998. 67. P.131-150.
2. Fazio E., Renzi F., Rinaldi R., Bertolotti M., Chauve M., Ramadan W., Petris A., Vlad V.I. Screening-photovoltaic bright solitons in lithium niobate and associated single-mode waveguides // Appl. Phys. Lett. 2004. V.85. P.2193.
3. Anastassiou Ch., Shih M., Mitchell M., Chen Z., Segev M. Optically induced photovoltaic self-defocusing-to-self-focusing transition // Opt. Lett. 1998. V.23. P.924.

**В.В. ГАЛУЦКИЙ, В.Ф. КУЗОРА, Е.В. СТРОГАНОВА**  
*Кубанский государственный университет, Краснодар*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГРАДИЕНТНОГО PPLN:ER<sup>3+</sup> ДЛЯ УСИЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ**

В работе рассмотрено влияние различных концентрационных профилей основных компонентов в ниобате лития на сглаживание коэффициента усиления Er<sup>3+</sup> в 1,5 мкм диапазоне в PPLN:Er.

**V.V. GALUTSKIY, V.F. KUZORA, E.V. STROGANOVA**  
*Kuban State University, Krasnodar*

## **APPLYING GRADIENT PPLN:ER<sup>3+</sup> TO AMPLIFY THE OPTICAL SIGNALS**

The paper discusses the effect of different concentration profiles of major components in lithium niobate for smoothing the gain of Er<sup>3+</sup> at 1.5 μm band in PPLN:Er.

Лазерные свойства однородного конгруэнтного ниобата лития, активированного эрбием, и использование его как усилителя оптических сигналов в 1,5 мкм диапазоне остаются невысокими, из-за низких значений коэффициента усиления, по сравнению, например, с некоторыми фторидными или теллуридными матрицами. Однако сочетание нелинейно-оптических свойств ниобата лития с лазерными свойствами при активации кристаллической матрицы ионами эрбия может расширить диапазон практического применения устройств на его основе, например при обработке оптических сигналов [1].

Для измерения спектра усиления кристаллов ниобата лития, активированного эрбием или эрбием и иттербием, использовался лазер накачки с длиной волны излучения 980 нм и мощностью излучения 100 мВт, сигнальный 1,5 мкм лазер с мощностью излучения 0,12 мВт. Регистрация спектров усиления производилась с помощью оптического спектроанализатора Yokogawa AQ6370C в диапазоне 1530-1620 нм (рис. 1). Видно, что, как и у любых эрбиевых усилителей, полоса усиления неравномерная по диапазону. Для выравнивания полосы усиления применяют оптические фильтры различных типов, например брэгговские решетки со спектром пропускания зеркально повторяющим контур усиления эрбия.

С другой стороны для сглаживания спектра усиления эрбия в ниобате лития возможно применение PPLN с градиентом периода или градиентом состава вдоль длины преобразователя. При рассмотрении режима работы PPLN как логического устройства [2] получается монотонная зависимость коэффициента экстинкции ER по длине волны при постоянных периоде решетки, длине волны накачки ( $\Lambda=18$  мкм,  $\lambda_p=1,55$  мкм) (рис. 2, кривая 1). Однако при использовании, например, градиентного PPLN с параболическим профилем концентрации в пределах 3% от оптимального спектр пропускания для оптических сигналов (рис. 2, кривая 2) начинает повторять спектр усиления ниобата лития с эрбием в диапазоне 1530-570 нм и подавлять полосу усиления 1580-1620 нм спектра усиления.

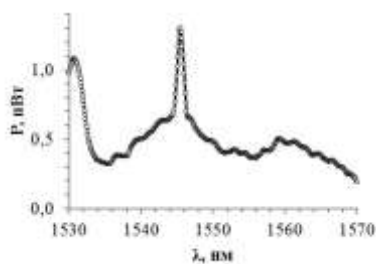


Рис. 1. Спектр усиления ионов  $\text{Er}^{3+}$  в градиентном PPLN

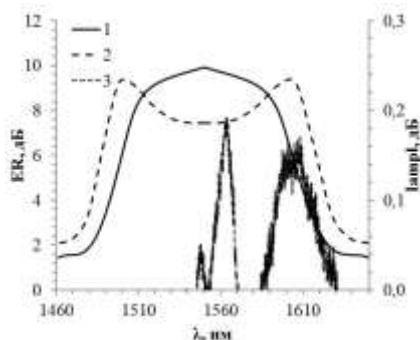


Рис. 2. Спектр коэффициента экстинкции PPLN и спектра усиления  $\text{Er}^{3+}$  в PPLN

Таким образом, при использовании градиентных PPLN, активированных эрбием появляется возможность эффективного сочетания возможностей реализации логических операций и управления профилем усиления оптического сигнала.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-48-230209 p\_a.

#### Список литературы

1. Галуцкий В.В., Кузора В.Ф., Строганова Е.В., Яковенко Н.А.// Сборник научных трудов конференции по фотонике и информационной оптике. М.: НИЯУ МИФИ, 2011. С.155-156.
2. Chang D., Lin Y.-W., Langrock C., Phillips C.R., Bennet C.V., Fejer M.M. // Optics Letters. 2016. V.41. P.400-403.

О.Ю. ПИКУЛЬ, Н.В. СИДОРОВ<sup>1</sup>, Н.А. ТЕПЛЯКОВА<sup>1</sup>,  
М.Н. ПАЛАТНИКОВ<sup>1</sup>

*Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск  
<sup>1</sup>Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья  
им. И.В. Тананаева Кольского научного центра РАН, Апатиты, Мурманская обл.*

## **ОПТИЧЕСКАЯ ОДНОРОДНОСТЬ МОНОКРИСТАЛЛОВ НИОБАТА ЛИТИЯ КОНГРУЭНТНОГО СОСТАВА**

Методом лазерной коноскопии при сканировании входной грани монокристаллов  $\text{LiNbO}_3$  конгруэнтного состава получены интерференционные картины, которые позволяют оценить оптическую однородность исследуемых образцов, выращенных из шихты с различными характеристиками

O.Yu. PIKOUL, N.V. SIDOROV<sup>1</sup>, N.A. TEPLYAKOVA<sup>1</sup>,  
M.N. PALATNIKOV<sup>1</sup>

*Far Eastern State Transport University, Khabarovsk  
<sup>1</sup>I.V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral  
Raw Materials of Kola Science Center of the RAS, Apatity, Murmansk region*

## **OPTICAL HOMOGENEITY OF LITHIUM NIOBATE SINGLE CRYSTALS OF CONGRUENT COMPOSITION**

By laser conoscopy when scanning the input face of  $\text{LiNbO}_3$  single crystals of congruent composition obtained interference patterns that allow us to estimate the optical homogeneity of the samples grown from the charge with different characteristics

Кристаллы  $\text{LiNbO}_3$  конгруэнтного состава, полученные из шихты с использованием в качестве экстрагента циклогексанона (ЦГН шихта) отличаются малым эффектом фоторефракции, напротив, кристаллы  $\text{LiNbO}_3$  конгруэнтного состава, полученные из смеси (ЦГН+А шихта) обладают значительным эффектом фоторефракции, индикатриса ФИРС в них раскрывается в первые 30 секунд с момента начала облучения кристалла лазерным излучением.

Все коноскопические картины, полученные для образца (ЦГН шихта) соответствуют одноосным кристаллам, свидетельствуют об оптической однородности и хорошем оптическом качестве исследуемого монокристалла (рис. 1). Увеличение мощности лазерного излучения до 90 мВт приводит к появлению дополнительной интерференционной структуры в области «мальтийского креста» (выделено кругом

на рис. 1 (2)) при сохранении в целом вида коноскопической картины одноосного кристалла.

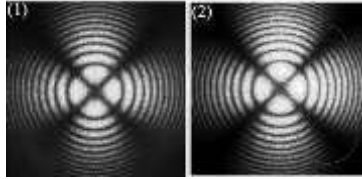


Рис. 1. Коноскопические картины кристалла  $\text{LiNbO}_3$  (ЦГН шихта):  
 $z=5$  мм,  $\lambda = 532$  нм.  $P = 1$  мВт (1) и 90 мВт (2)

На коноскопической картине кристалла  $\text{LiNbO}_3$  (ЦГН+А шихта) до отжига, ( $P = 1$  мВт) имеются признаки незначительной аномальной оптической двуосности: фрагменты «мальтийского креста» несколько смещены в горизонтальном направлении (рис. 2 (1)). При увеличении мощности лазерного излучения до 90 мВт признаки аномальной оптической двуосности усиливаются (рис. 2 (2)), что, вероятно, связано с существованием локальных областей в кристалле, обладающих двулучепреломлением. Вследствие пьезоэлектрического эффекта из-за разориентировки доменов по толщине кристалла возникает перпендикулярная составляющая электрического поля, приводящая к возникновению поперечного электрооптического эффекта. В результате этого отдельные области кристалла становятся двуосными.

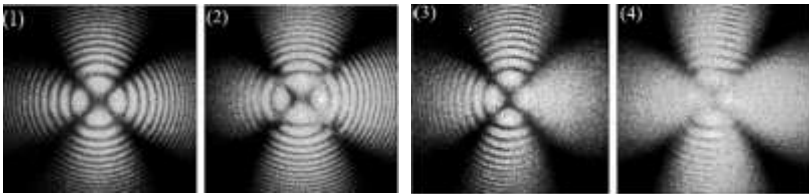


Рис. 2. Коноскопические картины кристалла  $\text{LiNbO}_3$  (ЦГН +А шихта):  
 $z=10$  мм,  $\lambda = 532$  нм,  $P = 1$  мВт (1), (3) и 90 мВт (2), (4); до отжига  
в закороченном состоянии (1), (2); после отжига – (3), (4)

Анализ коноскопических картин этого же кристалла после отжига в закороченном состоянии показывает, что отжиг отрицательно повлиял на оптическую однородность исследуемого образца. Все коноскопические картины (рис. 2 (3), (4)), полученные как при малой, так и при большой мощности лазерного излучения, являются более размытыми, контраст и четкость изображения значительно снижены.

А.В. СЮЙ, Е.О. КИЛЕ, Н.Н. ПРОКОПИВ,  
Н.В. СИДОРОВ<sup>1</sup>, М.Н. ПАЛАТНИКОВ<sup>1</sup>

*Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск  
<sup>1</sup>Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья  
им. И.В. Тананаева Кольского научного центра РАН, Апатиты, Мурманская обл.*

## **ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛА НИОБАТА ЛИТИЯ**

Коноскопическим методом исследована зависимость величины электрооптических коэффициентов кристаллов ниобата лития от вида и концентрации примеси. Определены значения электрооптических коэффициентов  $r_{22}$ ,  $(0,9r_{33} - r_{13})$  кристаллов ниобата лития, легированного Zn, Mg, Cu, B, Cu+Gd.

A. V. SYUY, E. O. KILE, N. N. PROKOPIV,  
N. V. SIDOROV<sup>1</sup>, M. N. PALATNIKOV<sup>1</sup>

*Far Eastern State Transport University, Khabarovsk  
<sup>1</sup>I. V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral  
Raw Materials of Kola Science Center of the RAS, Apatity, Murmansk region*

## **ELECTRO-OPTICAL PROPERTIES OF LITHIUM NIOBATE CRYSTALS**

The dependence of the electro-optic coefficients of lithium niobate crystals on the type and concentration of impurities by conoscopic method are investigated. The values of electro-optic coefficients  $r_{22}$ ,  $(0,9r_{33} - r_{13})$  of lithium niobate crystals doped with Zn, Mg, Cu, B, Cu + Gd are determined.

На основе электрооптического эффекта работает множество датчиков и оптических приборов [1, 2]. Кристаллы ниобата лития обладают целым рядом ярких физических свойств, в том числе электрооптическими свойствами. Эти свойства обусловлены высокими значениями электрооптических коэффициентов [1]. Кристалл ниобата лития является фазой переменного состава [4], поэтому его свойствами можно управлять путем изменения состава кристалла (Li/Nb) и его легированием. В данной работе исследовались кристаллы ниобата лития, легированные Zn, Mg, Cu, B, Cu + Gd с концентрациями до 0,89 % вес. Получение материала с заданными свойствами является одной из приоритетных задач современного материаловедения.



Целью данной работы является выявление зависимости между видом, концентрацией примеси и значениями электрооптических коэффициентов кристалла ниобата лития. Коноскопическим методом получены интерференционные картины кристалла ниобата лития в виде Мальтийского креста (излучение распространяется вдоль оси  $z$ ) и двух семейств гипербол (излучение распространяется вдоль оси  $x$ ,  $y$ ). При приложении электрического поля к кристаллу коноскопическая картина деформируется: Мальтийский крест становится двусосным, гиперболы сдвигаются. По сдвигу интерференционных полос определены  $r_{22}$ ,  $(0,9r_{33} - r_{13})$  для кристаллов ниобата лития с примесями Zn, Mg, Cu, B, Cu + Gd. Результаты сведены в табл. 1.

Таблица 1

## Электрооптические коэффициенты кристаллов ниобата лития

Вид и концентрация, % вес.	$r_{22}$ , пм/В	$(0,9r_{33} - r_{13})$ , пм/В
Zn	0,018	11,3
	0,03	11,33
	0,52	11,4
	0,615	17,2
	0,88	20,7
Mg	0,03	15,94
	0,25	
	0,5	13,8
	0,89	6,33
Cu+Gd	0,005+0,004	7,39
	0,007+0,02	4,16
	0,013+0,101	7,32
Cu	0,22	21,3
B	0,12	32
номинально чистый		6,46
		29,3

Следует отметить, что большинство результатов соответствует данным других авторов [3], но некоторые значения значительно отличаются. Это может быть связано с реальной структурой кристаллов и их свойствами.

## Список литературы

1. Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. СПб.: Наука, 1992.
2. Кузьминов Ю.С. Ниобат и танталат лития – материалы для нелинейной оптики. М.: Наука, 1975.
3. Aillerie M., Th'eofanus N., Fontana M.D. Measurement of the electro-optic coefficients: description and comparison of the experimental techniques // Appl. Phys. B. 2000. 70. P.317–334.

В.Г. ДЮ, М.Г. КИСТЕНЕВА, С.М. ШАНДАРОВ,  
М.Д. МОШКИНА

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники*

**СПЕКТРЫ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ КРИСТАЛЛА  
 $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca}$ , ПОДВЕРГНУТОГО ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ  
ЗАСВЕТКЕ КОРОТКОВОЛНОВЫМ И ДЛИННОВОЛНЫМ  
ИЗЛУЧЕНИЕМ**

Представлены результаты экспериментальных исследований изменений в спектральных зависимостях оптического поглощения в кристалле  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca}$ , наведенных непрерывным излучением с длинами волн в диапазоне от 532 до 1064 нм.

V.G. DYU, M.G. KISTENEVA, S.M. SHANDAROV,  
M.D. MOSHKINA

*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*

**OPTICAL ABSORPTION SPECTRA OF  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca}$  CRYSTAL  
EXPOSED BY SEQUENTIAL ILLUMINATION  
TO SHORT- AND LONG-WAVELENGTH RADIATION**

We present the results of experimental studies of changes in spectral dependence of optical absorption in the  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca}$  crystal, which have been induced by continuous radiation with the wavelengths in the range from 532 to 1064 nm.

Кристаллы семейства силленитов  $\text{Bi}_{12}\text{MO}_{20}$  ( $M = \text{Ge}, \text{Si}, \text{Ti}$ ), проявляющие хорошие фоторефрактивные свойства и сравнительно высокое быстродействие, используются в динамической голографии и ее приложениях в качестве реверсивной среды [1]. В работах [2, 3] было экспериментально установлено, что предварительная засветка нелегированных кристаллов титаната висмута видимым излучением значительно увеличивает эффективность двухволнового взаимодействия на формируемых в них световыми пучками из ближней ИК-области фоторефрактивных голограммах. В работе [4] было обнаружено, что засветка легированного кристалла  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Al}$  светом с длиной волны 532 нм приводит к его затемнению, а последующая экспозиция более длинноволновым излучением просветляет его, причем максимум просветления наблюдается при экспозиции на длине волны около 670 нм.

В данном сообщении представлены результаты экспериментальных исследований спектров оптического поглощения в диапазоне 500 – 1000 нм в кристалле  $\text{Vi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca}$ , подвергнутом на первом этапе засветке непрерывным излучением с длиной волны  $\lambda_d = 532$  нм и интенсивностью  $15,4$  мВт/см<sup>2</sup> на входной грани образца, на втором – экспозиции более длинноволновым излучением с  $\lambda_r = 596, 633, 655, 871$  и  $1064$  нм.

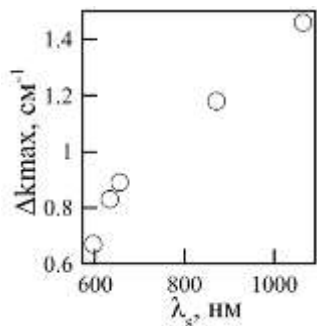


Рис. 1. Зависимость максимальных изменений показателя поглощения от длины волны просветляющего излучения

В экспериментах исследовался образец  $\text{Vi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca}$  с оптически полированными гранями (100), толщиной  $d = 1,5$  мм. Спектры пропускания кристалла регистрировались как до, так и после каждой засветки непрерывным излучением на спектрофотометре Genesys-2000 в диапазоне 500-1000 нм. Облучение кристалла осуществлялось до насыщения в спектрах. В исследуемом образце облучение зеленым светом (532 нм) в течение 30 мин приводило к максимальному увеличению оптического поглощения, с формой спектра, не изменяющейся от эксперимента к эксперименту. Последующая экспозиция кристалла, находящегося в таком состоянии максимального поглощения, длинноволновым излучением с  $\lambda_r = 596, 633, 655, 871$  и  $1064$  нм приводило к его просветлению. Зависимость достигаемых в насыщении максимальных значений изменения показателя поглощения  $\Delta k_{max}$  от длины волны просветляющей засветки показана на рис. 1. Следует отметить, что в отличие от кристалла  $\text{Vi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Al}$  [4], величина максимального просветления кристалла  $\text{Vi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca}$  монотонно возрастает с длиной волны вызывающего его излучения во всем исследуемом спектральном диапазоне, от 596 до 1064 нм.

Работа выполнена в рамках задания Минобрнауки РФ на 2015 – 2016 гг. и НИР по проектной части госзадания № 3.878.2014/ИК.

#### Список литературы

1. Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. С-Пб, 1992.
2. Odoulov S.G., Shcherbin K.V., Shumeljuk A.N. // J. Opt. Soc.Am. B. 1994. V.11. №9. P.1780–1785.
3. Dos Santos P.V., Frejlich J., Carvalho J.F. // Appl. Phys. B. 2005. V.81. P.651–655.
4. Dyu V.G., Kisteneva M.G., Shandarov S.M., et al. // Physics Procedia. V.73. P.131-135.

А.И. ИВАНОВА, С.А. ТРЕТЬЯКОВ, К.А. СЛОБОДЯНЮК,  
А.А. ТАРГОНИЙ

*Тверской государственной университет*

## **ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТИ НА ОПТИЧЕСКОЕ ПРОПУСКАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ ГЕРМАНИЯ**

В работе исследовано пропускание образцов монокристаллов германия в инфракрасном диапазоне волн. Показано влияние качества обработки исследуемых образцов на их оптическое пропускание

A.I. IVANOVA, S.A. TRETYAKOV, K.A. SLOBODYANYUK,  
A.A. TARGONIY

*Tver State University*

## **THE INFLUENCE OF SURFACE CHARACTERISTICS ON THE OPTICAL TRANSMISSION OF GERMANIUM SINGLE CRYSTALS**

In this work we studied the transmission of germanium single crystals in the infrared wavelength ranges. It is shown that processing quality influence on the optical transmission of the investigated samples

Монокристаллический германий является одним из самых востребованных материалов инфракрасной оптики, что связано с оптимальным набором его физических и оптических свойств [1, 2]. Высокое оптическое качество образцов кристаллов германия определяется не только малой плотностью дефектов и влиянием легирующей примеси, но и качеством обработки оптических поверхностей

Целью работы является исследование влияния способов обработки оптических элементов и параметров их поверхностей на пропускание монокристаллических образцов германия в диапазоне (1,5-25 мкм). Реальная оптическая поверхность имеет сложный профиль, определяемый методами обработки [3]. Поверхности оптических элементов характеризуются такими параметрами как среднее арифметическое отклонение профиля ( $R_a$ ), высота неровностей профиля ( $R_z$ ), среднеквадратическое отклонение шероховатости поверхности ( $R_q$ ) и др.

Исследования проводились на монокристаллах германия, выращенных способом Чохральского в направлении  $\langle 111 \rangle$ , легированных сурьмой (удельное сопротивление  $\rho=11-13$  Ом·см;  $n$ -тип проводимости; концентрация электрически активных примесей  $1.2 \times 10^{14}$  см $^{-3}$ ). Обработка поверхностей осуществлялась двумя способами: шлифовка и полировка алмазными пастами (1 способ), обработка абразивными суспензиями (2 способ). Оценка параметров полученных поверхностей проводилась на оптическом профилометре NanoMap 1000WLI, регистрация спектров пропускания – на Фурье-ИК спектрометре Tensor 27 (результаты представлены в таблице).

Исследуемые образцы Ge (способ обработки)	Ra, nm	Rz, nm	Rq, nm	Коэффициент пропускания ( $\lambda = 10,6$ мкм), %
1 способ	3.168	17.695	3.642	42,4
2 способ	2.661	15,794	3.354	46,5

Анализ 3-d профилей поверхностей позволяет сделать вывод о наличии микронеровностей (особенно, в случае первого способа обработки), которые заметно влияют на оптическое пропускание образцов (рис. 1).

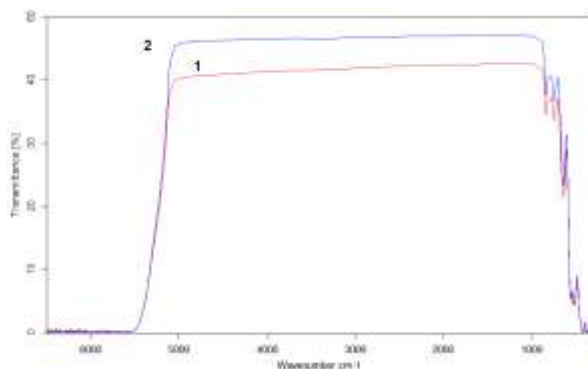


Рис. 1. Спектры пропускания германия (1,5–25 мкм):  
1 – первый способ обработки, 2 – второй способ обработки

#### Список литературы

1. Каплунов И.А. и др. // Оптика и спектроскопия. 2016. Т.120. №4. С.691–696.
2. Claey's C.L., Simoen E. Germanium-based Technologies: From Materials to Devices. Berlin: Elsevier, 2007.
3. Барышников Н.В. и др. // Молодежный научно-технический вестник. 2012. №6. С.30.

С.А. ТРЕТЬЯКОВ, И.А. КАПЛУНОВ, А.А. ТАРГОНИЙ,  
К.А. СЛОБОДЯНЮК

*Тверской государственной университет*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИЗЛУЧЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ ГЕРМАНИЯ С РАЗЛИЧНОЙ ШЕРОХОВАТОСТЬЮ ПОВЕРХНОСТИ**

В работе представлены коэффициенты излучения, измеренные для монокристаллов германия с полированной и шлифованной поверхностями. Полученные значения позволяют минимизировать ошибки измерений при тепловизионных исследованиях методом активного теплового контроля, а также при ИК-дефектоскопии.

S.A. TRETYAKOV, I.A. KAPLUNOV, A.A. TARGONIY,  
K.A. SLOBODYANYUK

*Tver State University*

## **THE DETERMINATION OF THE EMISSIVITY OF GERMANIUM CRYSTALS WITH DIFFERENT ROUGHNESS OF SURFACE**

In this paper presents the emissivity of single crystals of germanium with polished and brushed surfaces. The obtained values allow to minimize measurement errors during thermal - imaging studies by the method of active thermal control and IR- inspection.

Тепловизионные исследования широко применяют в науке и технике при исследованиях тепловых свойств материалов методом активного теплового контроля, для дефектоскопии полупроводниковых и оптических кристаллов, для анализа распределения температуры внутри работающих приборов для оптимизации их характеристик и для разработки систем охлаждения [1, 2]. При выращивании монокристаллов поверхность слитка оказывает существенное влияние на характер теплообмена в системе кристалл-расплав-окружающая среда, особенно при выращивании в вакууме, когда преобладает теплопередача излучением.

При тепловизионных измерениях помимо параметров среды (температура воздуха, влажность, температура наведённого излучения), немаловажную роль играет правильно определенный коэффициент излучения (КИ), величина которого зависит от материала, шероховатости

поверхности и в незначительной мере от температуры образца [3]. Неправильно выставленные значения КИ могут привести к ошибке в определении температуры до 10-15°C.

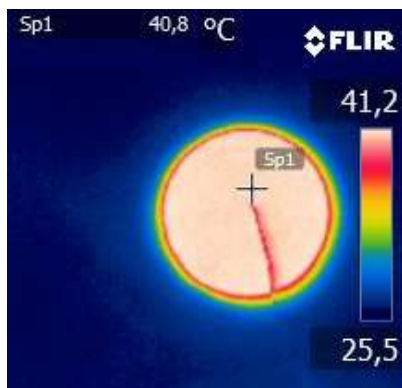


Рис. 1. Тепловизионное изображение образца. Sp1 – точка измерения тепловизором, ниже располагается термомпара

В работе использовался монокристаллический германий, из которого были подготовлены образцы диаметром 100 мм с ориентацией плоскости в направлении  $\langle 111 \rangle$ . Часть образцов полировали химико-механическим способом, часть оставляли со шлифованной поверхностью (шлифопорошок M28). Образцы нагревались до 90-100°C, после чего располагались на предметном столике, где производились замеры температуры тепловизором FLIR T250 и измерителем температуры CENTER 304 (рис. 1) в процессе их остывания по трем точкам.

В таблице представлены результаты измерений, где  $\Delta T$  – максимальная разность между значениями температуры на тепловизоре и термомпаре.

T, °C	Полированный Ge		Шлифованный Ge	
	КИ	$\Delta T$ , °C	КИ	$\Delta T$ , °C
40	0.77	0.3	0.81	0.4
50	0.76	0.3	0.8	0.3
60	0.75	0.1	0.79	0.2

Полученные результаты измерений позволяют применять КИ при тепловизионных исследованиях методом активного теплового контроля, а также в ИК-дефектоскопии.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках реализации работ проекта по государственному заданию по научной деятельности.

#### Список литературы

1. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. М.: ИД Спектр, 2009.
2. Aldave I.J., Bosom P.V., et al. // Infrared Physics & Technology. 2013. V.61. P.167-175.
3. Christofferson J., Maize K., et al. // 2007 International Conference on Thermal Issues in Emerging Technologies: Theory and Application, Cairo, 2007. P.3-9.

А.Д. МОЛЧАНОВА, К.Н. БОЛДЫРЕВ  
*Институт спектроскопии РАН, Троицк*

## **УЗКИЕ РЕЗОНАНСНЫЕ ЛИНИИ В ТЕРАГЕРЦОВОМ СПЕКТРЕ МОНОКРИСТАЛЛА $\text{Cu}_3\text{V}_2\text{O}_6$ : ПРИРОДА И СВОЙСТВА**

В работе представлено исследование фоновых мод слоистого монокристалла  $\text{Cu}_3\text{V}_2\text{O}_6$ . В терагерцовой области спектров пропускания обнаружены линии, связанные, по всей видимости, с межслоевыми колебаниями  $\text{Cu}_3\text{V}_2\text{O}_6$ . Некоторые ИК-активные фоновые моды демонстрируют зависимость от температуры с особенностью при  $T_c = 13$  К, что свидетельствует о спин-решёточном взаимодействии при магнитном упорядочении.

A.D. MOLCHANOVA, K.N. BOLDYREV  
*Institute for Spectroscopy of the RAS, Troitsk*

## **NARROW RESONANCE LINES IN THE TERAHERTZ SPECTRA OF THE $\text{Cu}_3\text{V}_2\text{O}_6$ SINGLE CRYSTAL: NATURE AND PROPERTIES**

The work presents an investigation of the phonon modes of the layered  $\text{Cu}_3\text{V}_2\text{O}_6$  single crystal. The lines apparently associated with interlayer vibrations of  $\text{Cu}_3\text{V}_2\text{O}_6$  have been found in the terahertz region of the transmission spectra. Some IR active phonon modes exhibit the temperature dependence with a singularity at  $T_c = 13$  K, which points to the spin-lattice interaction at the magnetic ordering.

$\text{Cu}_3\text{V}_2\text{O}_6$  кристаллизуется в триклинной сингонии (пространственная группа - ) [1]. Примитивная ячейка  $\text{Cu}_3\text{V}_2\text{O}_6$  содержит 110 атомов, а ион  $\text{Cu}^{2+}$  занимает 16 неэквивалентных позиций с различной координацией относительно атомов  $\text{O}^{2-}$ . Средние расстояния Cu-O внутри слоя составляют 1.95 Å, в то время как между слоями они равны 2.90 Å, следовательно, спиновая система предположительно является квазидвумерной [2]. По данным работ [2, 3] ниже температуры  $T_c = 10$  К, магнитная подсистема  $\text{Cu}_3\text{V}_2\text{O}_6$  переходит в состояние, которое является суперпозицией магнитоупорядоченного (для одиночных спинов) и синглетного (для четвёрок и пар спинов).

Целью работы является исследование динамики решётки  $\text{Cu}_3\text{V}_2\text{O}_6$  экспериментальными методами ИК-спектроскопии пропускания и НПВО света и теоретическим методом симметричного анализа фоновых мод.



Фононный спектр соединения, измеренный методом НПВО, имеет необычайно богатую структуру, что связано с большим количеством атомов в примитивной ячейке и низкой симметрией структуры  $\text{Cu}_3\text{V}_2\text{O}_6$ .

На рис. 1 приведена температурная карта интенсивностей спектров пропускания в диапазоне  $29 - 34 \text{ см}^{-1}$  и соответствующие спектры пропускания при температурах 15, 70 и 140 К. На рисунках можно наблюдать две узкие ( $\Delta\nu_1 = 0.3 \text{ см}^{-1}$  и  $\Delta\nu_2 = 0.5 \text{ см}^{-1}$ ) линии с частотами  $\nu_1 = 30.2$  и  $\nu_2 = 32.6 \text{ см}^{-1}$  при температуре  $T = 3.5 \text{ К}$ , которые, по всей видимости, относятся к межслоевым колебаниям. При повышении температуры обе линии уширяются, что связано с увеличением тепловых колебаний атомов решётки, и претерпевают значительный сдвиг по частоте. На вставке показана зависимость положения линии  $32.6 \text{ см}^{-1}$  от температуры. Как видно, график обладает особенностью при температуре  $T_c = 13 \text{ К}$ , что свидетельствует о спин-решёточном взаимодействии.

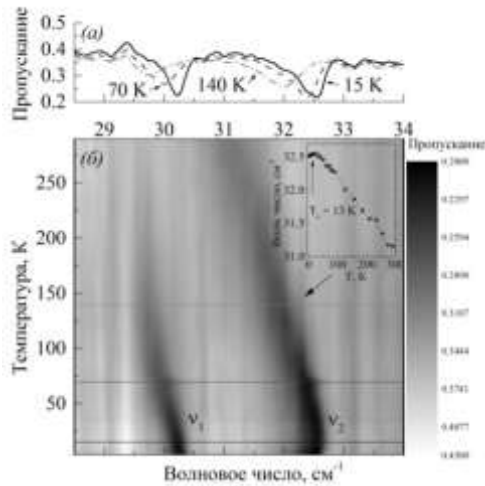


Рис. 1. Спектры пропускания  $\text{Cu}_3\text{V}_2\text{O}_6$  при температурах 15 К, 70 К и 140 К (а), карта интенсивностей спектров пропускания, оси волновое число - температура (б)

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №15-02-07451 и гранта Президента РФ для поддержки молодых ученых (МК-3521-2015.2).

*Список литературы*

1. Behn H. // Acta Cryst. 1982. V. 82. P.2781.
2. Петраковский Г.А., Саблина К.А., Воротынов А.М. и др. // ФТТ. 1999. Т.41. С.677.
3. Петраковский Г.А., Безматерных Л.Н., Баюков О.А. и др. // ФТТ. 2007. Т.49. С.1255.

С.В. ИВАНОВА

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

## **НЕСОРАЗМЕРНЫЕ ФАЗЫ В НАНОДОМЕННОМ КРИСТАЛЛЕ**

Проведен анализ картин рассеяния в дальнем поле лазерного луча, прошедшего через нелинейный кристалл барий натриевого ниобата в температурной области 20-600°C. Результаты сопоставлены с данными структурных исследований. Сделан вывод о квази-тетрагональной структуре несоразмерной фазы в области 460-550°C. Квази-тетрагональная структура наблюдалась и в области 20-460°C при направлении луча перпендикулярно с-оси.

S.V. IVANOVA

*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

## **INCOMMENSURATELY PHASES IN NANODOMAIN CRYSTAL**

The analysis of the scattering patterns in the far field of the laser beam passing through the nonlinear crystal of barium sodium niobate in the temperature range of 20-600°C have been performed. The results were examined by taking into consideration of the structural investigations. It was concluded that the structure of incommensurately phase in range of about 460-550°C is quasi-tetragonal. The quasi-tetragonal structure has appeared also in range of 20-460°C if the laser beam was perpendicular to c-axis.

В настоящей работе проведено сопоставление результатов температурного поведения картин рассеяния, полученных при прохождении луча лазера через кристалл барий натриевого ниобата (BSN), и данных о температурной эволюции нанодоменных структур.

Кристалл имеет сложную последовательность трансформаций кристаллической решетки при изменении температуры: два структурных фазовых перехода – сегнетоэлектрический при температуре 550°C в тетрагональную фазу и сегнетоэластический вблизи температуры 300°C в орторомбическую несоразмерную фазу [1-4]. В этих работах обнаружены две несоразмерные фазы в области ниже 300°C при охлаждении: 2q фаза с модуляцией вдоль [100] и [010] направлений и 1q фаза с модуляцией вдоль [100], а также переходная область 2q/1q трансформации фаз. 2q состояние имеет квази-тетрагональную структуру; 1q состояние имеет орторомбическую структуру. В нашей работе [5] показано, что

температурные изменения интенсивности несмещенной компоненты рассеяния и картины рассеяния в дальнем поле коррелируют со структурными фазовыми переходами при 300°C и 550°C и с температурной эволюцией нанодоменных структур в области несоразмерной фазы ниже 300°C [2, 3].

При исследовании температурных свойств рассеяния BSN в дальнем поле было обнаружено три типа картин в зависимости от направления и поляризации луча относительно кристаллографических осей: круги, эллипсы, полосы и сочетание этих типов. Было обнаружено, что изменение типа картин на экране соответствует переходу от 1q к 2q в температурной области 20-300°C: 1q – штрихи (20-230°C), 1q/2q штрихи и эллипсы (230-250°C) – переходная область, 2q – эллипсы (270-300°C) при направлении луча вдоль оптической с-оси и поляризации вдоль а- или b-осей. При любых сочетаниях направления луча и поляризации в области температур 460-550°C наблюдались эллипсы. Эллипсы наблюдались также в температурной области 20-460°C при направлении луча перпендикулярно оптической с-оси и поляризации луча параллельной этой оси. Сделан вывод, что несоразмерная фаза, обнаруженная вблизи 460°C имеет квази-тетрагональную структуру на основании анализа температурного поведения несмещенной компоненты, картин рассеяния на экране в дальнем поле ниже и выше 300°C и структурных данных.

Картини рассеяния были получены путем возбуждения кристаллов излучением аргонового лазера ( $\lambda = 514.5$  нм), образцы имели размер  $5 \times 5 \times 3$  мм<sup>3</sup>. Поляризация луча в разных экспериментах была параллельна или перпендикулярна оптической оси кристалла. Изображения картин регистрировались на экране в дальнем поле на расстоянии 250 см от образца.

#### *Список литературы*

1. Schneck J., Toledano J.C., Joffrin C., Aubree J., Joukoff B., Gabelotaud A. Neutron scattering study of the tetragonal-to-incommensurate ferroelastic transition in barium sodium niobate // Phys. Rev. B 25. 1982. P.1766-1785.
2. Mori S., Yamamoto N., Koyama Y., Uesu Y. Memory effect, defect density wave, and related structure in incommensurate phase of barium sodium niobate // Phys. Rev. B 52. 1995. P.6158-6161.
3. Kiat J. M., Calvarin G, Schneck J. Coexistence of the 1q and 2q incommensurate phases and memory effect in barium sodium niobate // Phys. Rev. B 49. 1994. P.776-785.
4. Pan X., Hu M., Yao M., Feng D. Tem study of the incommensurate phase and related phase transitions in barium sodium niobate // Phys. Stat. Sol. (a) 92. 1985. P.57-68.
5. Ivanova S.V. Central peak in Raman-scattering spectra of nanodomain crystal. //AASCIT Journal of Nanoscience. 2015. 1(4). P.39-42.

Е.С. ХУДЯКОВА, С.М. ШАНДАРОВ, М.Г. КИСТЕНЕВА,  
В.Г. ДЮ, С.В. СМОРНОВ, Т.А. КОРНИЕНКО<sup>1</sup>

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск*

## **ТЕРМОИНДУЦИРОВАННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ОПТИЧЕСКОМ ПОГЛОЩЕНИИ В НЕЛЕГИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛАХ ГЕРМАНАТА ВИСМУТА**

Представлены результаты исследований изменений в спектральных зависимостях оптического поглощения в диапазоне 400 – 1000 нм в нелегированных кристаллах  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ , подвергнутых отжигу в воздушной атмосфере при  $T_{\text{отж}} = 370$  °С.

E.S. KHUDYAKOVA, S.M. SHANDAROV, M.G. KISTENEVA,  
V.G. DYU, S.V. SMIRNOV, T.A. KORNIENKO<sup>1</sup>

*Tomsk State University of Control System and Radioelectronics  
<sup>1</sup>Belarusian State University, Minsk*

## **THERMOINDUCED CHANGES IN OPTICAL ABSORPTION IN THE UNDOPED BISMUTH GERMANIUM OXIDE CRYSTALS**

The results of investigation of the changes in spectral dependences of optical absorption in the spectral range of 400 - 1000 nm for undoped  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  crystals annealing in air atmosphere at temperature 370 °C are presented.

В работе [1] получено, что заметное влияние температурного отжига на оптическое поглощение имеет место для кристаллов титаната и силиката висмута (ВТО и BSO), но не обнаруживается для исследованного образца германата висмута (BGO). В настоящей работе показано, что термоиндуцированные изменения в оптическом поглощении наблюдаются и в кристаллах BGO. В экспериментах использовались образцы BGO с толщинами  $d_1 = 1,8$  мм и  $d_2 = 10,5$  мм, которые подвергались термическому отжигу в воздушной атмосфере при температуре  $T_{\text{отж}} = 370$ °С в течение 60 мин. Спектры пропускания регистрировались как до, так и после отжига в диапазоне 400 – 600 нм для образца с толщиной  $d_1 = 1,8$  мм и 463-1100 нм для образца с толщиной  $d_2 = 10,5$  мм. Спектры показателя поглощения  $k(\lambda)$  и  $\Delta k(\lambda)$  в диапазоне 400 – 1000 нм были получены путем «сшивки» спектров для образцов с толщинами  $d_1 = 1,8$  мм и  $d_2 = 10,5$  мм для состояний, соответствующих исходному и

достигаемому после отжига. На рис. 1 представлена спектральная зависимость наведенных изменений в поглощении  $\Delta k(\lambda)$ , полученная вычитанием из показателя поглощения в исходном состоянии его значений

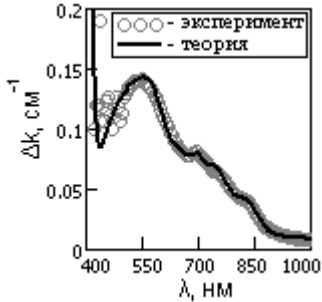


Рис. 1. Спектр  $\Delta k(\lambda)$  для кристалла BGO

проводимости с глубоких донорных центров и краевого поглощения, подчиняющегося правилу Урбаха [1], удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными.

Для определения отличий в характеристиках образцов BGO, исследованных в настоящем сообщении и в работе [1], с ними были проведены эксперименты, показавшие, что значения оптического вращения для них одинаковы и составляют  $33,1 \pm 0,4$ ,  $18,5 \pm 0,3$ ,  $11,8 \pm 0,2$  и  $10,9 \pm 0,2$  угл. град/мм на длинах волн 532, 655, 780 и 870 нм, соответственно. Не было выявлено существенных различий при сравнении колебательных спектров комбинационного рассеяния света в области  $0-800 \text{ см}^{-1}$  и спектров трехфононного поглощения в области  $1100-2000 \text{ см}^{-1}$ . Однако рентгеноструктурный анализ показал, что исследованный ранее в работе [1] образец BGO с толщиной 6,9 мм имеет блочную структуру с преимущественной ориентацией кристаллитов в направлении [100], в то время как описанные выше образцы с толщинами 1,8 и 10,5 мм характеризуются монокристаллической структурой высокого качества с ориентацией граней по плоскостям (100).

Работа выполнена в рамках задания Минобрнауки РФ на 2015–2016 гг. и НИР по проектной части госзадания № 3.878.2014/ИК.

#### Список литературы

1. Kisteneva M.G., Khudyakova E.S., Shandarov S.M., et. al. // Quantum Electronics. 2015. V.45(7). P.685.

П.С. АНАНЬЕВ, И.Л. МАРТЫНОВ, Е.В. ОСИПОВ,  
Д.С. ДОВЖЕНКО, А.А. ЧИСТЯКОВ  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МИКРОРЕЗОНАТОРОВ ИЗ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ**

Приведены результаты экспериментальных исследований по влиянию температуры на оптические свойства микрорезонаторов из пористого кремния. Обнаружено, что оптические свойства окисленных образцов устойчивы при циклическом нагревании и охлаждении, в то время как неокисленные образцы демонстрируют необратимый синий сдвиг при нагревании.

P.S. ANANEV, I.L. MARTYNOV, E.V. OSIPOV,  
D.S. DOVZHENKO, A.A. CHISTYAKOV  
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*

## **TEMPERATURE INFLUENCE ON OPTICAL PROPERTIES OF POROUS SILICON MICROCAVITIES**

The results of temperature influence on optical properties of porous silicon microcavities in range -10 – 150 °C are present. The optical properties of the oxidized samples are resistant to cyclic heating and cooled, while the reflective spectrum of unoxidized samples gets permanent blue shift by heating.

В настоящее время большой интерес представляют оптические сенсоры, преимуществами которых являются быстрый отклик на изменение внешних условий и высокая чувствительность. В качестве элементов оптических датчиков можно использовать микрорезонаторы на основе пористого кремния с внедрённым в них полимером. Это даёт возможность детектировать, например, взрывчатые вещества с помощью механизмов тушения люминесценции [1]. Такие структуры получают методом электрохимического травления кремния в водно-спиртовом растворе плавиковой кислоты [2].

Для переносных приборов важно знать условия, в которых этот прибор будет работать без сбоев и ложных срабатываний, поэтому необходимо определить рабочий диапазон температур чувствительного элемента.

Для изготовления микрорезонаторов в данной работе использовался монокристаллический кремний КДБ, с удельным сопротивлением 0,003-0,005 Ом·см и ориентацией поверхности (100). Электрохимическое

травление кремния проводилось на установке, выполненной из фторопласта. Electroдами служили – платиновая пластина (катод) и образец монокристаллического кремния на алюминиевой пластине (анод).

Процесс электрохимического травления проходил в водно-спиртовом растворе плавиковой кислоты ( $\text{HF}:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} - 1:2$ ). В качестве источника тока использовался прецизионный прибор KEITHLEY 2600A, с помощью которого задавался синусоидальный профиль тока.

Изготовленные образцы микрорезонаторов обладали запрещенной зоной фотонной зоной шириной  $\sim 150$  нм, центр которой приходился на диапазон длин волн 540-560 нм. Ширина собственной моды микрорезонаторов составляла 5-7 нм. В работе исследовались неокисленные и окисленные образцы микрорезонаторов. Окисление второй группы образцов провалилось при помощи раствора перекиси водорода в этиловом спирте в пропорции 9:1.

Охлаждение и нагрев образцов проводились с помощью элемента Пельтье. В процессе экспериментов измерение температуры и запись спектров отражения проводились в реальном времени.

Установлено, что при нагреве до  $150$  °C и последующем охлаждении до комнатной температуры как для окисленного, так и для неокисленного образцов наблюдается сдвиг спектра отражения в синюю область. Величина сдвига для окисленного образца составила не более 3 нм, для неокисленного – 5 нм. Через сутки положение спектра отражения окисленного образца вернулся в своё первоначальное состояние, тогда как спектр неокисленного остался без изменений. Наблюдаемые эффекты, по всей видимости, обусловлены сочетанием процессов термодесорбции и термического окисления, которое приводит к необратимому синему сдвигу изначально неокисленного образца. При циклическом охлаждении до температуры точки росы зарегистрирован обратимый красный сдвиг спектров отражения как для окисленного, так и неокисленного образцов. Что связано с обратимым процессом сорбции молекул из окружающей среды на поверхность микрорезонатора.

Полученные результаты могут быть использованы при оптимизации режимов работы сенсорных элементов из пористого кремния.

Исследования выполнены при поддержке гранта Президента Российской Федерации (№ МК-4937.2016.2).

#### *Список литературы*

1. Meaney M.S., McGuffin V.L. Luminescence-based methods for sensing and detection of explosives. 2008. P.2557-2576.
2. Lehmann V., Gösele U. Porous silicon formation: A quantum wire effect. // Appl. Phys. Lett. 1991. V.58 No 8. P.856-858.

А.И. КОЛЕСНИКОВ, И.А. КАПЛУНОВ, М.Б. ЛЯХОВА,  
С.А. ТРЕТЬЯКОВ, Н.В. АЙДИНЯН  
*Тверской государственной университет*

## **АЗИМУТАЛЬНЫЕ МАКСИМУМЫ В ИНДИКАТРИСАХ ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА ПОЛИРОВАННЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ МОНОКРИСТАЛЛОВ**

Изучены особенности индикатрис отражения лазерного света от хорошо отполированных кристаллов. Резкие максимумы на индикатрисах наблюдались на удаленном экране в виде ярких узких полос, отходящих от центрального пятна, соответствующего правильному отражению. Показано, что наблюдаемые картины коррелируют с ориентациями по плоскостям спайности наклоненных площадок наноразмеров (10–40 нм) и обусловлены отражением в соответствии с законами геометрической оптики.

A.I. KOLESNIKOV, I.A. KAPLUNOV, M.B. LYAKHOVA,  
S.A. TRETIKOV, N.V. AIDINYAN  
*Tver State University*

## **AZIMUTHAL MAXIMA IN INDICATRICES OF LIGHT REFLECTION BY POLISHED SINGLE CRYSTAL SURFACES**

A study is made of the peculiarities of laser optical reflection indicatrix of highly polished single crystals. Sharp maxima in the reflection indicatrix were observed at a distant screen in the form of bright narrow bands diverging from the central normal reflection spot. It is shown that the observed light patterns are in correlation with the orientations of inclined nanoscale (10–40 nm) cleavage pads and may be explained by reflection rules of classical geometrical optics.

При отражении лазерных лучей, падающих на плоские поверхности монокристаллов некоторых веществ, отполированные по высоким классам чистоты и имеющие малые параметры шероховатости  $R_a$  (10–40 нм), в некоторых направлениях наблюдаются резкие максимумы в виде узких полос на экране, расположенном со стороны лазера. На рис. 1а показана картина отражения лазерного луча от плоскости (110) монокристалла парателлуриата, имеющей параметр шероховатости  $R_a=20$  нм, наблюдаемая на удаленном экране. При вращении кристалла вокруг луча полосы поворачиваются на экране соответственно повороту кристалла (рис. 1б).



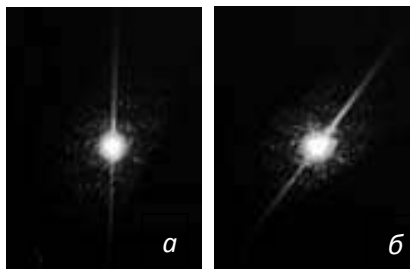


Рис. 1. Картины отражения лазерного света от полированной поверхности (110) монокристалла парателлурита до (а) и после (б) поворота вокруг оси луча

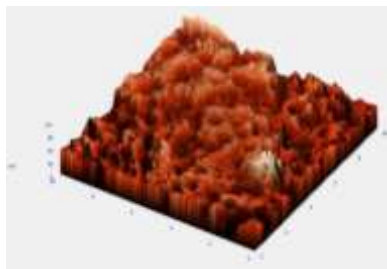


Рис. 2. Полученное методом атомно-силовой микроскопии трехмерное изображение полированной поверхности монокристалла германия

Установлено, что ориентации максимумов отражения жестко связаны с определенными кристаллографическими направлениями, различными для кристаллов разных веществ. Они соответствуют ориентациям проекций нормалей к плоскостям спайности кристаллов. У парателлурита, например, такими плоскостями являются плоскости  $\{100\}$ , у германия –  $\{111\}$ . Объяснение этого явления состоит в селективном отражении света микроплощадками, соответствующими спайности, образовавшимися в микрорельефе при шлифовке и полировке. Гипотеза подтверждена экспериментально при исследованиях поверхности кристаллов методами РЭМ и АСМ. На рис. 2 показано трехмерное изображение полированной поверхности монокристалла германия, полученное с помощью атомно-силового микроскопа Solver P47. Анализ изображений поверхностей кристаллов показал, что самые мелкие неровности в рельефе составлены плоскостями спайности. Средние размеры площадок составляют  $a \sim 20$  нм, что намного меньше длин волн излучения используемых лазеров  $\lambda \sim 500$  нм. Заметим, что классический закон отражения считается справедливым для противоположного соотношения между длиной волны света и размерами неоднородностей  $\lambda \ll a$ . Изученный эффект дает основание для распространения в ряде случаев области применимости закона отражения на видимый свет вплоть до чрезвычайно малых линейных размеров отражающих площадок, что соответствует выводам в некоторых современных работах. Он должен учитываться при проектировании оптических лазерных систем, в состав которых входят элементы из отполированных по высоким классам чистоты кристаллов.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках реализации проекта по государственному заданию по научной деятельности.

Е.А. ИЛЬИНА<sup>1</sup>, А.Ю. ХМЕЛЕВ<sup>1</sup>, У.В. ЮРИНА<sup>2</sup>, А.И. СИДОРОВ<sup>1,3</sup>

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

<sup>2</sup>*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

<sup>3</sup>*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ»*

## **ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ЗАПИСЬ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В КРИСТАЛЛАХ LiF и KBr**

Приведены результаты экспериментов по формированию люминесцентных центров и центров окраски в приповерхностном слоях кристаллов LiF и KBr при облучении электронным лучом. Показана возможность многоуровневой записи оптической информации.

Е.А. ILINA<sup>1</sup>, А. Yu. KHMELEV<sup>1</sup>, U.V. YURINA<sup>2</sup>, A.I. SIDOROV<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>*Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University*

<sup>3</sup>*Saint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI»*

## **OPTICAL INFORMATION RECORDING IN LiF AND KBr CRYSTALS BY ELECTRON BEAM**

The results of experiments on the formation of luminescence and coloring centers in the near-surface layers of LiF and KBr by electron beam irradiation are presented. The ability of multilevel optical information recording is shown.

Во все времена существовала проблема записи и надежного хранения постоянно увеличивающегося объема информации. Одним из современных способов ее решения является оптический метод записи данных на носитель. Основная идея метода заключается в кодировании информации. Однако для увеличения плотности записи необходимо использовать кодировки высокого порядка.

Целью данной работы является изучение возможности многоуровневой электронной записи оптической информации в кристаллах LiF и KBr.

В экспериментах были использованы полированные пластины кристаллов LiF и KBr. Локальное облучение образцов проводилось электронным лучом с энергией электронов 50 кэВ.

Эксперименты показали, что в облученных участках образцов LiF при дозе облучения 2...30 мКл/см<sup>2</sup> возникает интенсивная люминесценция в зеленой и красной областях спектра (см. вставку на рис. 1), причем,

интенсивность люминесценции растет с увеличением дозы облучения (рис. 1). При этом модуляция интенсивности люминесценции достаточна для многоуровневой записи информации, например, в восьмеричном коде. Электронное облучение кристаллов КВг не приводит к появлению люминесценции в видимой области спектра. При дозах облучения, больших  $30 \text{ мКл/см}^2$ , в облученных зонах кристаллов появляются центры окраски в виде наночастиц Li и K, обладающие плазмонным резонансом [1], приводящим к появлению полос поглощения на длинах волн 450 нм и 625 нм соответственно. В случае LiF это приводит к желтому или коричневому окрашиванию облученных зон. В случае КВг – к синему окрашиванию. Интенсивность плазмонных полос поглощения также увеличивается с увеличением дозы электронного облучения (рис. 2).

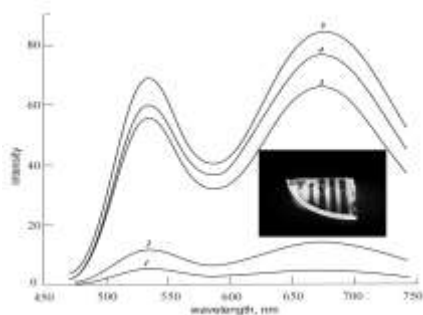


Рис. 1. Спектры люминесценции LiF после электронного облучения. 1-5: увеличение дозы от 15 до  $35 \text{ мКл/см}^2$ , возбуждение – 450 нм

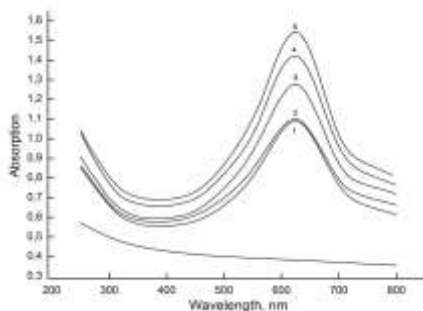


Рис. 2. Спектры поглощения КВг после электронного облучения. 1-5: увеличение дозы от 2 до  $100 \text{ мКл/см}^2$

Таким образом, электронное облучение кристаллов LiF и КВг позволяет записывать оптическую информацию, путем создания люминесцентных центров и/или центров окраски. Зависимость интенсивности люминесценции и поглощения от дозы облучения дает возможность записывать информацию в кодах высокого порядка, например, в восьмеричном коде. Так как электронный луч может быть сфокусирован в пятно диаметром менее 10 нм, данный метод позволяет существенно увеличить плотность записи информации.

#### Список литературы

1. Климов В.В. Наноплазмоника. М.: Физматлит, 2009.

Б.В. СОКОЛЕНКО, Д.А. ПОЛЕТАЕВ, А.О. КОВАЛЕВА,  
Н.В. ПЕТРОВ<sup>1</sup>, И.А. ШЕВКУНОВ<sup>1</sup>

*Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь*  
<sup>1</sup>*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФАЗЫ СИНГУЛЯРНЫХ ПУЧКОВ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В ОДНООСНОМ КРИСТАЛЛЕ**

Исследованы физические механизмы, обуславливающие особенности формирования и трансформации структуры фазовых сингулярностей в пучках, переносящих оптический вихрь при распространении ортогонально оптической оси кристалла. Представлены результаты численного моделирования и экспериментального анализа, указывающие на характер образования топологических диполей в поле после кристалла для различных углов поворота и смещения исходного вихря в сечении пучка.

B.V. SOKOLENKO, D.A. POLETAEV, A.O. KOVALYOVA,  
N.V. PETROV<sup>1</sup>, I.A. SHEVKUNOV<sup>1</sup>

*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol*  
<sup>1</sup>*ITMO University, Saint-Petersburg*

## **TRANSFORMATION OF SINGULAR BEAM PHASE PROPAGATING IN UNIAXIAL CRYSTAL**

The physical mechanisms that determine features of vortex beam structural transformation are studied. Presented results of numerical simulation and experimental analysis indicate the nature of topological dipoles formation in the field after the crystal in case of different rotational angles and the initial vortex displacement in the beam cross section.

Анизотропный отклик среды одноосных кристаллов в случае падения пучка с циркулярной поляризацией ортогонально оптической оси приводит к формированию астигматических полей: необыкновенного и обыкновенного пучков, обладающими ортогональными поляризациями и различной формой поперечного сечения профиля интенсивности [1]. Структурные преобразования интенсивности и профиля пучка анизотропной средой затрагивают все структурные особенности падающих полей, в частности, фазовые сингулярности – оптический вихрь. Анализ эволюции полей, переносящих оптические вихри, расположенные на оси пучка, либо в ее окрестности для левой и правой

компонент круговой поляризации указывает на особенности формирования фазовой картины при малых возмущениях: в случае смещения вихря и поворота кристалла на малый угол относительно оси пучка. Результатом воздействия двулучепреломляющей среды на такие пучки приводит к образованию топологических диполей – вихрей с противоположными знаками заряда в окрестности линий изохром [2].

Целью работы является теоретический анализ и экспериментальное исследование преобразования фазовой структуры скалярных сингулярностей, распространяющихся ортогонально оптической оси в одноосном кристалле в рамках программы АММУР» ГСУ/2016/3.

Сравнительный анализ результатов численного моделирования (рис. 1, а, в) с результатами эксперимента (рис. 1, б, г) указывают на формирование в окрестности пучка зоны топологических реакций, совмещенной с изгибом семейства изоклин – линий равной интенсивности и фазы, представляющих собой локальную краевую дислокацию как в случае дробного топологического заряда  $l = 1/2$  (рис. 1, а, б), так и целого  $l = 1$  (рис. 1, в, г).

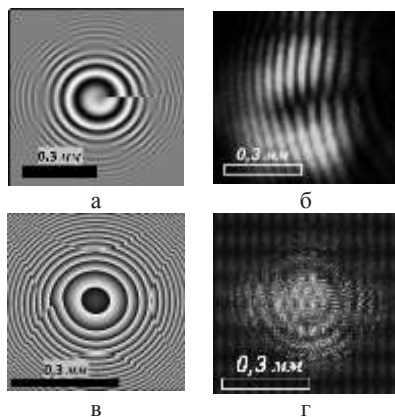


Рис. 1. Распределение фазы сингулярных пучков в поле после кристалла

Смещение оптического вихря относительно оси пучка формирует область рождения фазовых неоднородностей, которые взаимодействуют с исходным вихрем, влияя на траекторию его движения. Главным образом это связано с расходимостью сингулярностей в обычном и необыкновенном пучках. С увеличением расстояния между осью пучка и центром вихря растет продольное смещение вихря в необыкновенном пучке, усиливая разрыв дипольных пар.

#### Список литературы

1. Ciattoni A, Palma C. // J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis. 2003. No 20(11). P.2163-2171.
2. Sokolenko B.V., Rubass A.F., et. al. // Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics, 2013. V.16, N 4. P.344-348.

С.М. КОСТРИЦКИЙ, Ю.Н. КОРКИШКО, В.А. ФЕДОРОВ  
*НПК Оптилинк, Зеленоград*

## **ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЙ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ 1×2 НА ОСНОВЕ КАНАЛЬНЫХ ВОЛНОВОДОВ В КРИСТАЛЛАХ LiNbO<sub>3</sub>**

Интегрально-оптический переключатель 1×2, использующий электрооптически-управляемый направленный ответвитель, был создан в кристаллах LiNbO<sub>3</sub> методом протонного обмена. Созданный нами интегрально-оптический переключатель имеет специально разработанный Y-образный делитель мощности, обеспечивающий получение высокого контраста переключения и низкого значения управляющего напряжения.

S.M. KOSTRITSKII, Yu.N. KORKISHKO, V.A. FEDOROV  
*Optolink Ltd, Zelenograd*

## **ELECTROOPTIC 1×2 SWITCH BASED ON CHANNEL WAVEGUIDES IN LiNbO<sub>3</sub> CRYSTALS**

Integrated-optic 1×2 switch utilizing electrooptically controllable directional coupler has been developed in LiNbO<sub>3</sub> substrates with proton exchange technology. Such an integrated-optic switch has the newly designed Y-branching power divider allowing for high switching contrast and low bias voltage.

Для практической реализации оптического переключателя на основе перестраиваемого разветвителя использована одна из наиболее теоретически перспективных схем. Эта схема представляет собой комбинацию Y-образного разветвителя сложной формы, которая включает в себя одновременно рупорный переход и cos-изгиб, направленного ответвителя, состоящего из двух близко расположенных (8 мкм) канальных волноводов, и участка плавного разведения канальных волноводов на большое расстояние (320 мкм) друг от друга. Использование этой схемы позволило получить значения коэффициента деления близкие к 50/50 и устойчивые к небольшим неизбежным отклонениям технологических параметров при изготовлении интегрально-оптического элемента [1].

Нанесение трех копланарных электродов длиной 12 мм на участке направленного ответвителя позволило получить линеаризованную зависимость коэффициента связи канальных волноводов от напряженности

внешнего электрического поля. Таким образом, мощность оптического излучения в каждом из волноводов на выходе из направленного ответвителя линейно зависит от внешнего напряжения. Отклонение от линейности сложным образом зависит от степени оптического перекрытия соседних канальных волноводов, а использование выбранной схемы, в отличие от ряда других схем, позволяет выполнить прецизионную подстройку оптимальной величины степени оптического перекрытия волноводов с помощью технологической операции дополнительного низкотемпературного отжига.

Канальные волноводы изготовлены методом отожденного протонного обмена (ПО) на пластинах X-среза кристаллов ниобата лития. Условия протонного обмена и последующего низкотемпературного отжига были выбраны так, чтобы сформировать одномодовые канальные волноводы для излучения суперлюминесцентного диода с центральной длиной волны 1530 нм. Прецизионная подстройка степени оптического перекрытия световодов на участке направленного ответвителя осуществлена с помощью дополнительного многошагового отжига, состоящего из серии коротких шагов (15 мин). Суммарная длительность дополнительного отжига имеет разные значения для разных образцов в интервале от 15 до 75 минут. Этот разброс значений обусловлен небольшим неизбежным отклонением технологических параметров при проведении ПО [1]. Таким образом, применение дополнительного отжига контролируемой длительности позволило нам провести оптимизацию параметров переключателя, т.е. уменьшить как величину переключающего напряжения, так и увеличить контраст переключения.

*Список литературы*

1. Kostritskii S.M., Korkishko Yu.N., Fedorov V.A. Electrooptic 1\*2 switch based on proton-exchanged channel waveguides in LiNbO<sub>3</sub>. // Proc. SPIE. 2015. V.9516. P.951612.

Е.А. ДЬЯКОНОВ, Д.Л. ПОРОХОВНИЧЕНКО  
*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

## **ПОЛУКОЛЛИНЕАРНЫЙ РЕЖИМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЕРАГЕРЦЕВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН С УЛЬТРАЗВУКОМ В КРИСТАЛЛЕ ПАРАТЕЛЛУРИТА**

Предложена схема акустооптической ячейки для взаимодействия электромагнитных волн терагерцевого диапазона с ультразвуком. Показано, что использование кристалла парателлурита позволяет получить эффективное акустооптическое взаимодействие при длинах волн излучения 0,8...1 мм.

E.A. DYAKONOV, D.L. POROKHOVNICHENKO  
*Lomonosov Moscow State University*

## **SEMICOLLINEAR REGIME OF INTERACTION OF TERAHERTZ ELECTROMAGNETIC WAVES WITH ULTRASOUND IN PARATELLURITE CRYSTALS**

Presents the layout of an acousto-optical cell for the interaction of terahertz electromagnetic waves with ultrasound. It is shown that the usage of paratellurite crystal allows to obtain efficient acousto-optic interaction at radiation wavelengths 0,8...1 mm.

Акустооптические (АО) устройства, в основе которых лежит принцип дифракции света на ультразвуке, широко применяются в диапазоне от ультрафиолетового до среднего инфракрасного излучения. Значительный интерес представляет применение АО методов также и для более длинных электромагнитных волн, то есть в терагерцевой (ТГц) области спектра.

Эффективность дифракции  $I$ , равная доле отклоненной энергии излучения, обратно пропорциональна квадрату длины волны [1], и при переходе от оптического к ТГц диапазону падает на несколько порядков. Кроме того, величина  $I$  прямо пропорциональна коэффициенту АО качества  $M_2$ . В свою очередь, этот коэффициент пропорционален шестой степени показателя преломления [1]. Поскольку диэлектрическая проницаемость кристаллов в СВЧ области больше, чем в оптической, величина  $M_2$  для ТГц излучения также оказывается на несколько порядков больше, чем для видимого и ИК излучения. Это позволяет компенсировать падение эффективности дифракции при увеличении длины волны.

Кристалл парателлурита ( $\text{TeO}_2$ ) является одним из наиболее широко применяемых АО материалов, его максимальное АО качество достигается



при дифракции света на медленной сдвиговой акустической волне [1]. Однако использование данной волны в АО устройстве ТГц диапазона невозможно, потому что расходимость ультразвука не позволит создать коллимированного акустического пучка. Поэтому предложенная схема АО ячейки основана не на поперечной, а на полуколлинеарной дифракции [2]. Используется квазисдвиговая ультразвуковая волна, распространяющаяся под углом  $8^\circ$  к оси [110] кристалла. Угол сноса энергии этой волны равен  $51^\circ$ , а коэффициент АО качества в 2 раза меньше, чем для сдвиговой.

Минимальная длина волны ТГц излучения определяется поглощением в кристалле [3], а максимальная – расходимостью излучения при заданной апертуре АО ячейки. Так, устройство с размерами области взаимодействия  $5 \times 5 \times 5$  мм может работать при длинах волн в пределах  $0,8 \dots 1$  мм. Из-за того, что апертура устройства сравнима с длиной волны излучения, используются сходящиеся лучи (рис. 1). Исходя из литературных данных по величине показателя преломления парателлурита в ТГц диапазоне [3], коэффициент АО качества для полуколлинеарной дифракции можно оценить как  $M_2 = 5 \times 10^{-11} \text{ с}^3/\text{кг}$ . Тогда эффективность дифракции при мощности ультразвуковой волны  $P = 25$  Вт имеет порядок  $I = 0,15$  на длине волны  $0,8$  мм и  $I = 0,1$  на длине волны  $1$  мм. Частота ультразвуковой волны при этом изменяется от  $5,5$  МГц до  $4,5$  МГц, соответственно. Такие величины являются приемлемыми для построения АО устройства.

Работа поддержана грантом РФФ № 14-12-00380.

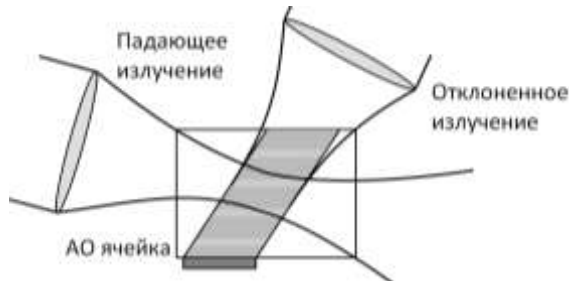


Рис. 1. Принципиальная схема АО устройства с полуколлинеарной дифракцией

#### Список литературы

1. Балакший В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики. М., 1985.
2. Дьяконов Е.А., Волошинов В.Б., Поликарпова Н.В. // Оптика и спектроскопия. 2015. Т.118. № 1. С.172.
3. Unferdorben M., Bužady A., Hebling J., et al. // J. of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. 2016. V.37 P.703.

П.А. НИКИТИН

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

## **КВАЗИОРТОГОНАЛЬНАЯ АКУСТООПТИЧЕСКАЯ ДИФРАКЦИЯ НА ЗАКРУЧЕННОМ ЗВУКОВОМ ПУЧКЕ**

Приведены результаты численного моделирования акустооптического взаимодействия плоской электромагнитной волны с акустическим пучком, обладающим ненулевым топологическим зарядом. Исследовано влияние затухания акустической волны в дифракционном элементе, используемом для формирования закрученного пучка, на параметры акустооптического взаимодействия.

P.A. NIKITIN

*Lomonosov Moscow State University*

## **QUASI-ORTHOGONAL ACOUSTO-OPTIC DIFFRACTION ON VORTEX SOUND BEAM**

Presents the result of numerical simulation of acousto-optic interaction between plane electromagnetic wave and acoustic beam with nonzero topological charge. Was examined influence of sound attenuation in diffractive element used for vortex beam formation on parameters of acousto-optic interaction.

Понятие закрученного света было введено в работе [1] для описания электромагнитного излучения с угловым моментом  $l$ . Фаза такого излучения зависит от азимутального угла  $\varphi$  как  $\exp(il\varphi)$ . Аналогичное понятие применимо и к акустическому полю. Указанной зависимости от угла  $\varphi$  можно добиться, если на пути электромагнитной или акустической волны расположить дифракционный элемент – пластинку переменной толщины, зависящей только от  $\varphi$  и имеющей скачок  $h$  при  $\varphi = 0$  [2].

Как известно, при квазилинейном акустооптическом (АО) взаимодействии выполняется закон сохранения углового момента [3]. Это открывает возможность управления угловым моментом излучения, тем самым увеличивая пропускную способность канала информации. Данная работа посвящена исследованию квазиортогонального режима АО дифракции на закрученном звуке до сих пор не описанного в литературе.

Пусть волновой вектор звука  $\vec{K}$  много меньше волнового вектора электромагнитного излучения  $\vec{k}$ . Поэтому можно считать, что при дифракции Брэгга волновые вектора падающего на звуковой столб и дифрагированного излучения ортогональны волновому вектору звука. Рассмотрим режим малой эффективности АО взаимодействия, а также учтём наличие ненулевого коэффициента затухания  $\alpha_s$  звука в дифракционном элементе. Будем полагать, что угол  $\varphi$  отсчитывается от оси  $Ox$ , вдоль которой направлен волновой вектор  $\vec{k}$ , к оси  $Oy$ , составляющей правую тройку с  $\vec{k}$  и  $\vec{K}$ .

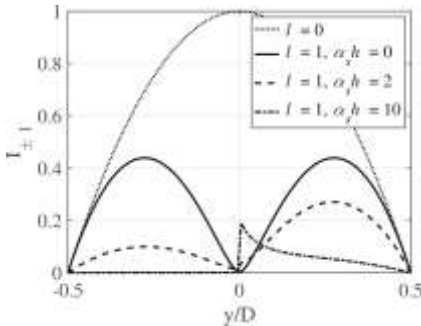


Рис. 1. Нормированная интенсивность дифрагированного излучения

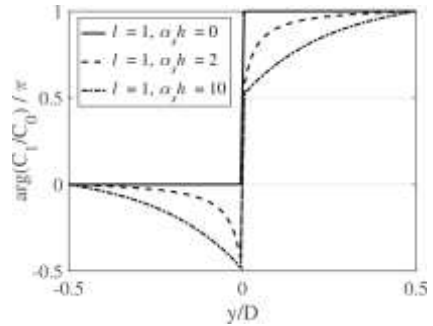


Рис. 2. Разность фаз дифрагированного и прошедшего излучения при  $l = 1$

На рис. 1 и 2 приведены результаты численного моделирования с использованием уравнений связанных мод, выполненного для звукового пучка круглого сечения с диаметром  $D$ . Здесь использованы следующие обозначения: 1)  $I_1$  – интенсивность дифрагированного излучения, нормированная на максимальное значение при  $l = 0$ ; 2)  $C_1, C_0$  – комплексные амплитуды излучения в 0 и 1 дифракционных порядках.

Из полученных графиков следует, что: 1) дифрагированное излучение нельзя считать закрученным; 2) затухание акустической волны в дифракционном элементе влияет на фазу дифрагированного излучения и на качественный вид зависимости  $I_1(y)$ .

#### Список литературы

1. Allen L., et. al. // Phys. Rev. A. 1992. V.45 (11). P.8185.
2. Rumala Y.S. // Optical Engineering. 2015. V.54 (11). P.111306
3. Belyi V.N., et. al. // Journal of Optics. 2016. V.18 (7). P.074002.

Я.Е. АКИМОВА, Ю.А. ЕГОРОВ, С.И. ХАЛИЛОВ

*Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь*

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ВОЗМУЩЕННОГО ПУЧКА БЕССЕЛЯ-ГАУССА,  
СФОРМИРОВАННОГО КОНУСОМ ВОЛНОВЫХ  
ВЕКТОРОВ, ПЕРЕНОСЯЩЕГО ДРОБНЫЙ  
ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ ЗАРЯД**

Возмущение Бессель-Гауссова пучка сопровождалось движением оси компьютерно-синтезированной голограммы относительно оси пучка. Результатом, наблюдаемым на эксперименте, была интерференционная картина. Исходя из ее анализа, было обнаружено, что за счет различных фокусировок можно добиться регулярного поля пучка, т.е. очистки поля без потерь энергии, меняя при этом всего лишь внутренний параметр динамической системы.

Ya.E. AKIMOVA, Yu.A. EGOROV, S.I. HALILOV

*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol*

**EXPERIMENTAL STUDY OF THE DISTURBED BEAM  
BESSEL-GAUSS SHAPED CONE OF WAVE VECTORS  
THAT CARRY FRACTIONAL TOPOLOGICAL CHARGE**

The perturbation of the Bessel-Gaussian beam was accompanied by a movement computee-sintezirovany axis of the hologram relative to the beam axis. The result observed in the experiment was an interference pattern. Based on its analysis, it was found that due to the different focus, you can achieve a regular field of the beam, i.e., clearing the field without loss of energy, changing only an internal parameter of the dynamic system.

Для проведения данного исследования была собрана экспериментальная установка (рис. 1), позволяющая получить пучок Бесселя-Гаусса при помощи конической линзы, т.е. аксикона. За счет движения компьютерно-синтезированной голограммы (КСГ), мы вносим некие возмущения, тем самым изменяя местоположение пучка [1]. После чего диафрагмой выделяем пучок, переносящий дробный топологический заряд  $l = -0,5$  и наблюдаем интерференционную картину, позволяющую описать траекторию движения топологических зарядов в сердцевине Бессель-Гауссова пучка [2].

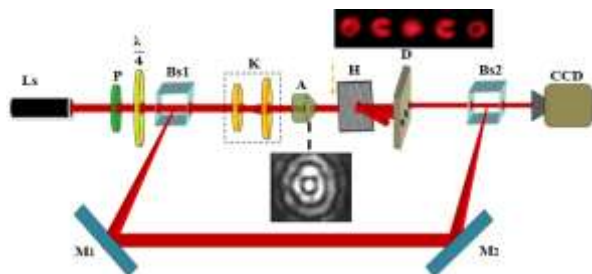


Рис. 1. Схема установки: Ls – лазер; P – поляризатор;  $\lambda/4$  – четвертьволновая пластинка; Bs – делительный кубик; H – голограмма; D – диафрагма; K – коллиматор; A – аксикон; M – зеркало; CCD – камера

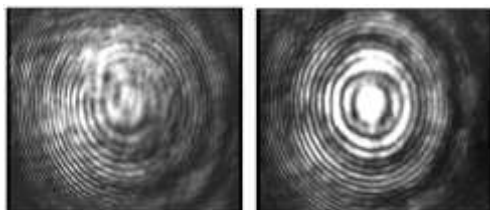


Рис. 2. «Очистка поля»

На эксперименте были зафиксированы измерения с шагом 100 микрон для разных фокальных плоскостей пучка (при  $f = 3, 5, 7,$  и  $9$  мм) прошедшего аксикон. Стоит отметить, что каждое кольцо это фактически вырожденная кольцевая дислокация, которая распадается на симметричный квадруполь.

По мере того как мы изменяем ось КСГ относительно оси пучка, наша интерференционная картина меняла свою структуру: происходит взаимодействие первоначальных зарядов с вновь образовавшимися, что тем самым приводит к рождению новых вихрей или к их аннигиляции.

Благодаря данному исследованию можно сделать вывод, что за счет различных фокусировок происходит очистка поля пучка, при которой без потерь энергии мы добиваемся регулярного поля, меняя при этом всего лишь внутренний параметр динамической системы (рис. 2).

#### *Список литературы*

1. Egorov Yu.A., Konovalenko V., et. al. Algebra of optical quarks: An experiment. // Proceedings of SPIE. 2013. V.9066. P.90660C.
2. Fadeyeva T.A., Alexeyev C.N., et. al. Vector erf-Gaussian beams: Fractional optical vortices and asymmetric TE and TM modes. // Optics Letters. V.37(9). P.1397-1399.

И.А. ИСМАИЛОВ, С.Н. ЛАПАЕВА

*Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь*

## ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ В ОДНООСНЫХ КРИСТАЛЛАХ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ПРАВОЦИРКУЛЯРНО ПОЛЯРИЗОВАННОГО ОПТИЧЕСКОГО КВАРКА

Экспериментально было исследовано преобразование интерференционной картины циркулярно поляризованного пучка, переносящего дробный топологический заряд при распространении через одноосный кристалл. Было обнаружено характерное распределение фазы, в правоциркулярной и левоциркулярной компоненте, при тех же условиях.

I.A. ISMAILOV, S.N. LAPAYEVA

*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol*

## TOPOLOGICAL REACTION TO THE DISTRIBUTION UNIAXIAL CRYSTAL RIGHT-CIRCULAR POLARIZED OPTICAL QUARKS

Experimentally converting the interference pattern of circularly polarized beam was investigated transporting fractional topological charge in the propagation through uniaxial crystal. Typical phase distribution was found in the left-circular and right-circular component under the same conditions.

Пучок, переносящий дробный топологический заряд (оптический кварк) получается с помощью фазового транспаранта (рис. 1), который формирует поле с фазовой сингулярностью, имеющий топологический заряд равным  $\frac{1}{2}$ . В результате прохождения оптического пучка сквозь этого транспаранта, рождается цепочка из оптических вихрей состоящая из дробно топологических вихрей и целых (рис. 2). С помощью диафрагмы выделяем дробный топологический заряд.

С помощью поляризационного фильтра выделим правоциркулярную компоненту электрического поля (рис. 3а). На интерференционной картине наблюдается характерное распределение фазы, свидетельствующая о наличии в предметном пучке дробного топологического заряда  $l = -\frac{1}{2}$ .

В **левоциркулярной** компоненте электрического поля (рис. 3б) на интерференционной картине в центре пучка наблюдается характерная «вилка», свидетельствующая о наличии топологического заряда, равного 1, а в области периферии пучка формируется сдвигка, соответствующая дробному топологическому заряду, равному  $\frac{1}{2}$ . При этом суммарный топологический заряд равен  $\frac{3}{2}$ . Отсюда следует, что левоциркулярная компонента переносит топологический заряд более высокого порядка, нежели правая компонента.

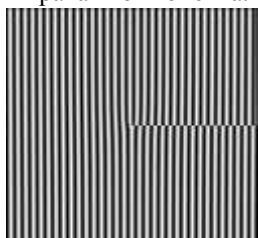


Рис. 1. Фазовый транспарант

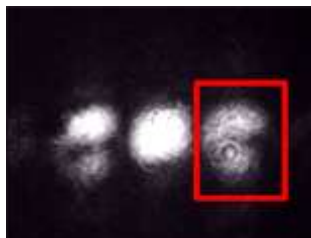


Рис. 2. Цепочка вихрей

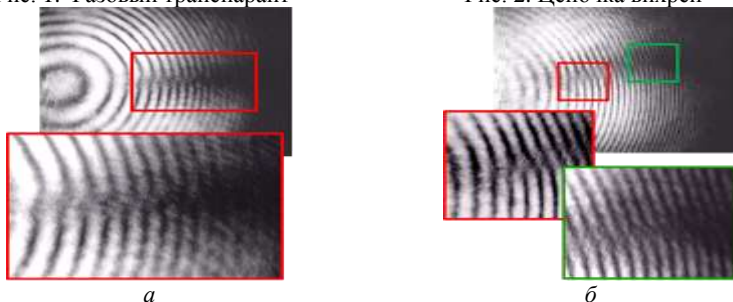


Рис. 3. Формирование фазовых сингулярностей в поле пучка, прошедшего одноосный кристалл  $\text{LiNbO}_3$  при правой (а) и при левой (б) компонентах электрического поля

Исследовалась зависимость положения характерного распределения фазы правоциркулярной компоненты электрического поля от угла  $\alpha$ . Угол  $\alpha$  – это угол между оптической осью кристалла и направлением пучка. Угол  $\alpha$  менялся от  $0^\circ$  до  $3^\circ$ .

#### Список литературы

1. Volyar A.V. Do optical quarks exist in free space: scalar treatment? // Simferopol: Taurida National University, General Physics Department.
2. Fadeyeva , Alexeyev С., Rubass А., Volyar А. Vector erf-Gaussian beams: fractional optical vortices and asymmetric TE and TM modes. // Opt. Lett. 2012. V.37. P.1397-1399.

А.О. КОВАЛЕВА, А.Ф. РЫБАСЬ,  
Н.В. ПЕТРОВ<sup>1</sup>, И.А. ШЕВКУНОВ<sup>1</sup>

*Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь*  
<sup>1</sup>*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **ПРЕОБРАЗОВАНИЯ УГЛОВЫХ МОМЕНТОВ В ЦИРКУЛЯРНО ПОЛЯРИЗОВАННОМ СИНГУЛЯРНОМ ПУЧКЕ С ДРОБНЫМ ТОПОЛОГИЧЕСКИМ ЗАРЯДОМ**

Показана возможность преобразования спинового углового момента в орбитальный угловой момент, при взаимодействии циркулярно поляризованного сингулярного пучка с дробным топологическим зарядом с двулучепреломляющей средой одноосного кристалла. Установлено, что при достижении критического значения угла  $\alpha = 2^\circ$  между осью циркулярно-поляризованного пучка и осью одноосного кристалла, топологический заряд сингулярного пучка, изменяет свое значение. Исходное полуцелое значение топологического заряда  $q = \frac{1}{2}$ , увеличивается вдвое, достигая целочисленного порядка  $q = -1$ , меняя знак заряда на противоположный.

A.O. KOVALYOVA, A.F. RUBASS,  
N.V. PETROV<sup>1</sup>, I.A. SHEVKUNOV<sup>1</sup>

*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol*  
<sup>1</sup>*ITMO University, Saint-Petersburg*

## **CONVERSION ANGULAR MOMENTA IN A CIRCULARLY POLARIZED SINGULAR BEAM WITH FRACTIONAL TOPOLOGICAL CHARGE**

The possibility of transformation of the spin angular momentum to the orbital angular momentum in the interaction of circularly polarized singular beam with fractional topological charge in a birefringent uniaxial crystal medium was shown. It was found that when the critical values of the angle  $\alpha = 2^\circ$  between the axis of the circularly polarized beam and the axis of uniaxial crystal topological charge of singular beam changes its value. The initial half-integer topological charge  $q = \frac{1}{2}$  is doubled, reaching integer order  $q = -1$  and changing the sign of the charge reversed.

В настоящее время исследуются различные методы, для создания устройств, позволяющих преобразовывать спиновый угловой момент в



орбитальный угловой момент в пределах одного и того же пучка света и контролировать процесс их взаимодействия [1-4].

Цель работы: исследовать преобразования угловых моментов в циркулярно-поляризованном сингулярном пучке с дробным топологическим зарядом в одноосном кристалле.

Теоретическое исследование распространения циркулярно-поляризованного пучка с полуцелым топологическим зарядом под углом к оптической оси одноосного кристалла, показало возможность преобразования спинового углового момента света в орбитальный угловой момент.

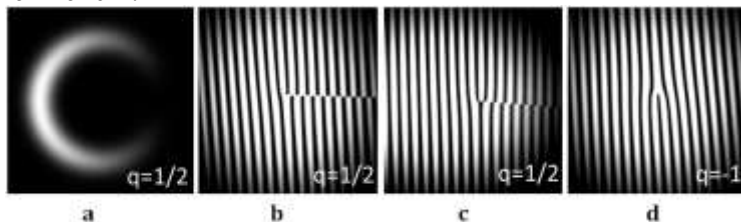


Рис. 1. Преобразование спинового углового момента в орбитальный угловой момент в циркулярно-поляризованном сингулярном пучке с дробным топологическим зарядом, распространяющемся под углом  $\alpha$  к оптической оси одноосного кристалла: распределение интенсивности пучка (а); интерференционные картины пучка:  $\alpha = 0, 75^\circ$  (b),  $\alpha = 1, 75^\circ$  (c),  $\alpha = 2^\circ$  (d)

Из полученных картин интерференции видно, что при достижении значения угла  $\alpha = 2^\circ$  между осью циркулярно-поляризованного пучка и осью одноосного кристалла, спиновый угловой момент, обусловленный циркулярной поляризацией, преобразуется в орбитальный угловой момент, связанный с геликоидальным волновым фронтом, а именно со значением топологического заряда.

Работа выполнена в рамках Проекта Программы развития ФГАОУ ВО "КФУ им. В.И. Вернадского" сеть «Академическая мобильность молодых ученых России – АММУР» ГСУ/2016/3.

#### Список литературы

1. Zhao Y.Q., Edgar J.S., Jeffries G.D., McGloin D., Chiu D.T. // Phys. Rev. Lett. 2007. 99. 073901.
2. Wang X.L., Chen J., Li Y.N., Ding J.P., Guo C.S., Wang H.T // Phys. Rev. Lett. 2010. 105. 253602.
3. Yonezawa K., Kozawa Y., Sato S. // Japanese Journal of Applied Physics. 2007. 46. P.5160-5163.
4. Gregg P., Mirhosseini M., Rubano A., Marrucci L., Karimi E., Boyd R.W., Ramachandran S. // Optics Letters. 2015. 40. Iss.8. P.1729-1732.

Б.А. КУЗЯКОВ, П.А. ИВАНОВ, Е.А. СКВОРЦОВ, Р.В. ТИХОНОВ  
*Московский технологический университет (МИРЭА)*

## КАЧЕСТВО ПРОХОДЯЩИХ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ В ВОЗМУЩЕННОЙ АТМОСФЕРЕ

В работе рассматриваются разветвленные сети телекоммуникации, включая атмосферные беспроводные оптические линии. Анализируется воздействие на лазерные пучки, атмосферы с параметрами, находящимися вне зоны Колмогоровской турбулентности. Показано сохранение топологического заряда вихревых пучков на значительных расстояниях.

B.A. KUZYAKOV, P.A. IVANOV,  
 E.A. SKVORTSOV, R.V. TICHONOV  
*Moscow Technological University (MIREA)*

## THE QUALITY OF THE PASSING LASER BEAM IN THE PERTURBED ATMOSPHERE

The paper discusses an extensive network of telecommunications, including wireless atmospheric optical line. Examines the effects on laser beams, atmosphere with parameters outside the zone of the Kolmogorov turbulence. It is shown the conservation of the topological charge of vortex beams at considerable distances.

В настоящее время интенсивно разрабатываются и широко применяются разветвленные сети телекоммуникации, включая атмосферные беспроводные оптические линии [1-4]. Базовыми параметрами лазерных пучков в атмосфере, служат: величины  $M^2$  и отношение Штреля (ШР). В данной работе анализируется воздействие атмосферы с параметрами, находящимися вне зоны Колмогоровской турбулентности (НКТ). При этом, величины отношений ШР для Гауссовых пучков в модели Шелла (ПГШ) при наличии вихря в условиях не - Колмогоровской турбулентности (НКТ), можно представить в виде:

$$S_R = \frac{(8z^2 A_0 + k^2 w^2)[2 - B_0 w_0^2 (1 - B_0 \rho^2) - C(1 - B_0 \rho^2)] \exp[-B_0 \rho^2]}{(8z^2 A + k^2 w^2)[2 - B_0 w_0^2 (1 - B_0 \rho^2) - C_0(1 - B_0 \rho^2)] \exp[-B_0 \rho^2]} \quad (1)$$

где коэффициенты:  $A, B, C, \dots$  – зависят от параметров пучка.

Анализ выражений типа (1), при наличии вихря и при его отсутствии, показывает, что величины ШР растут с ростом  $\alpha$  в диапазоне изменения  $3,11 \leq \alpha \leq 4$ . Кроме этого, в работе [5] экспериментально показано,

что топологический заряд пучков ПГШ сохраняется на значительных расстояниях в условиях не - Колмогоровской турбулентности при разных параметрах  $L_1(m)$  ( $L_0 \equiv L_1(m)$ ) турбулентности. Следует отметить, что для реализации методики с использованием мод ОАМ могут применяться несколько вариантов схем. Например, в работе [6] в схеме формирования лазерного пучка используются отражательные голограммы на входе и выходе оптической системы. Причем, контраст между первыми ближайшими модами ОАМ может превышать 0,9, при индексе  $\theta = 0,4$ . При  $\theta \geq 0,8$ , величина контраста между первыми 3-мя ближайшими модами ОАМ оказывается порядка 0,2.

Таким образом, в работе представлены особенности влияния не - Колмогоровской турбулентности на распространение лазерных пучков, включая сохранение топологического заряда вихревых пучков. Показано, что отличие в отношении ШР для пучков ПБГ и ПБГВ не превышает 15% в условиях слабой турбулентности атмосферы во всем диапазоне исследуемых параметров  $\{C_n^2 = (3 - 8) \cdot 10^{-15} \text{ м}^{-3-\alpha}\}$ .

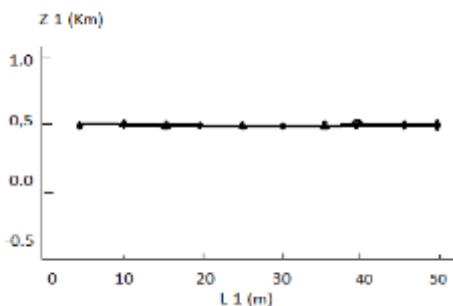


Рис. 1. Данные по измерению топологического заряда пучков ПГШ

#### Список литературы

1. Zhu K., et al. // Opt. Express. 2008. V.16. Is.26. P.21315-21320.
2. Милогин // Вестник связи. 2008. №2. С.89–90.
3. Li J., et al. // Optics Express. 2016. V.24. Is.18. P.20413–20423.
4. Кузяков Б.А., Кириллова Ю.А. // II Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике. Сборник научных трудов. М.: МИФИ, 2013. С.211-212.
5. Кузяков Б.А., Карпов М.А. и др. // Электромагнитные волны и Электронные системы. 2013. Т.18. № 12. С.38-43.
6. Gibson G., et al. // Optics Express. 2004. V.12. Is.22. P.5448-5456.

А.П. ПЛЁНКИН

*Южный федеральный университет, Таганрог*

## **ОБНАРУЖЕНИЕ ФОТОННОГО ИМПУЛЬСА СИНХРОНИЗАЦИИ В СИСТЕМЕ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧА**

Приведено описание алгоритма обнаружения фотонного импульса синхронизации в двухпроходной волоконно-оптической автокомпенсационной системе квантового распределения ключа с фазовым кодированием состояний фотонов. Предложен новый принцип обнаружения сигнального временного интервала, содержащего импульс синхронизации в процессе синхронизации.

A.P. PLJONKIN

*Southern Federal University, Taganrog*

## **DETECTION OF PHOTON IMPULSE OF SYNCHRONIZATION IN QUANTUM KEY DISTRIBUTION SYSTEM**

The description of the algorithm of detection of photon pulse synchronization in the two-pass optical fiber autocompensation quantum key distribution system with phase coding states of photons. A new principle of detection of the signal slot containing a sync pulse during synchronization.

Проблема обеспечения секретности при передаче сообщений формулируется как проблема распределения секретного ключа между корреспондентами. Альтернативой классического распределения ключей служит квантовое распределение ключа (КРК), которое опирается на фундаментальные законы квантовой физики в противоположность классическим математическим методам [1]. Принципы квантового распределения реализованы в программно-аппаратных комплексах – системах квантового распределения ключа (СКРК). Эффективная работа систем КРК возможна только при обеспечении синхронизации. В [2, 3] описаны основные принципы работы систем КРК и исследованы алгоритмы синхронизации с позиции несанкционированного доступа. В ходе экспериментальных исследований волоконно-оптической автокомпенсационной двухпроходной системы квантового распределения ключа с фазовым кодированием состояний фотонов установлено, что процесс синхронизации имеет уязвимость, что потенциально может служить для несанкционированного съема информации

злоумышленником. В [4] исследованы основные типы атак на квантовый канал связи системы КРК и показана возможность несанкционированного съема информации путем отвода части оптической мощности импульса синхронизации. В [5, 6] предложен алгоритм синхронизации СКРК с повышенной защищенностью от несанкционированного доступа. Алгоритм предполагает деление периода следования оптических импульсов на временные окна и поиск окна с фотонным импульсом. Алгоритм предполагает три этапа обнаружения фотонного импульса с дискретизацией интервалов. Особенностью алгоритма является использование ослабленного до фотонного уровня оптического импульса со средним числом фотонов в импульсе 0,1. Ослабление осуществляется при распространении оптического импульса в направлении от кодирующей станции к приемо-передающей, путем применения управляемого перестраиваемого аттенюатора.

Актуальным является поиск новых методов и алгоритмов, обеспечивающих повышенную защищенность процесса синхронизации автокомпенсационных систем квантового распределения ключа.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-37-00003 мол\_а.

*Список литературы*

1. Gisin N., Ribordy G., Tittel W., Zbinden H. Quantum cryptography // *Reviews of Modern Physics*. 2002. V.74. №1. P.145-195.
2. Румянцев К.Е., Плёнкин А.П. Синхронизация системы квантового распределения ключа при использовании фотонных импульсов для повышения защищённости // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2014. №8. С.81–96.
3. Румянцев К.Е., Плёнкин А.П. Синхронизация системы квантового распределения ключа в режиме однофотонной регистрации импульсов для повышения защищенности. // *Радиотехника*. 2015. №2. С.125-134.
4. Bennet C.H., et al. Experimental quantum cryptography // *J. Cryptol*. 1992. V.5. P.3-28.
5. Pljonkin A.P., Rumyantsev K.E. Single-photon synchronization mode of quantum key distribution system. // *International Conference on Computational Techniques in Information and Communication Technologies (ICCTICT)*. India, New Delhi. 2016. P.531–534.
6. Rumyantsev K.E., Pljonkin A.P. Preliminary Stage Synchronization Algorithm of Auto-compensation Quantum Key Distribution System with an Unauthorized Access Security. // *International Conference on Electronics, Information, and Communications (ICEIC)*. Vietnam, Danang, 2016. P.1-4.

Е.Ю. ЗЛОКАЗОВ, В.В. КРАСНОВ, В.А. НЕБАВСКИЙ,  
В.Г. ОСИПОВ<sup>1</sup>, И.В. СОЛЯКИН,  
Р.С. СТАРИКОВ, П.А. ЧЕРЁМХИН

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
<sup>1</sup>Научно-технический центр «Модуль», Москва*

## **МАКЕТ РАДИОФОТОННОЙ СИСТЕМЫ ВЫБОРКИ**

В работе представлены результаты моделирования системы оптической выборки радиосигналов.

E.Yu. ZLOKAZOV, V.V. KRASNOV, V.A. NEBAVSKIY,  
V.G. OSIPOV<sup>1</sup>, I.V. SOLYAKIN,  
R.S. STARIKOV, P.A. CHEREMKHIN

*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)  
<sup>1</sup>Research Centre «Module»*

## **MODEL OF MICROWAVE SAMPLING SYSTEM**

Results of modeling of C-band microwave sampling system are presented.

Методы оптической выборки к настоящему времени получили развитие применительно к выполнению аналого-цифрового преобразования [1-3]. Основной резон построения систем с оптической выборкой состоит в том, что высокая стабильность частоты повторения оптических импульсов, задающих такты дискретизации, обеспечивает малую апертурную ошибку - например, при использовании лазеров в режиме синхронизации мод на 1-2 порядка ниже, чем у лучших образцов электронных устройств; это преимущество потенциально позволяет достичь высокой точности преобразования.

Представляемая в данной работе экспериментальная система выборки использует расширенный стандартный оптический диапазон и базируется на коммерчески доступных компонентах. Схема показана на рис. 1. Импульсы лазера модулируются модулятором интенсивности и регистрируются фотодиодом, сигнал которого поступает на цифровой осциллограф. На настоящий момент установка обеспечивает возможность модуляции входным радиосигналом в полосе частот 20 ГГц, полоса частот фотодиода – 30 ГГц, для регистрации результирующих сигналов используется цифровой осциллограф со скоростью работы 80 Гвыб/с и

истинной аналоговой полосой 33 ГГц. Пример выходного сигнала системы представлен на рис. 2, пример восстановленного радиосигнала - на рис. 3. Установка обеспечивает проведение одно- и двухтоновых тестов, а также других измерений, необходимых для характеристики выполняемых с её помощью функций обработки радиосигналов.

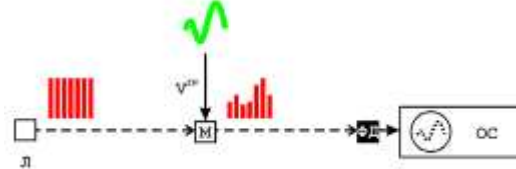


Рис. 1. Блок-схема системы выборки: Л – импульсный лазер, М – модулятор Маха-Цандера, ФД - фотодетектор, ОС – цифровой осциллограф

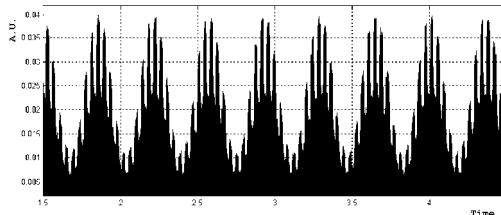


Рис. 2. Пример осциллограммы тонового радиосигнала, выбранного импульсами лазера

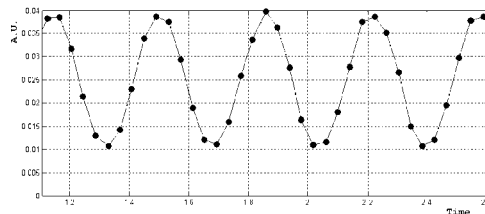


Рис. 3. Пример восстановленного тонового радиосигнала

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 14-29-08174.

#### Список литературы

1. Siegman A., Kuizenga D. Proposed method for measuring picosecond pulsewidths and pulse shapes in CW mode-locked lasers. // IEEE J. Quantum Electron. 1970. V.6. P.212-215.
2. Valley G. Photonic analog-to-digital converters. // Opt. Express. 2007. V.15. P.1955-1982.
3. Стариков Р.С. Фотонные АЦП. // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. №2. С.3-39.

Н.И. ПЕТРОВ, 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*

## **СУБВОЛНОВЫЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ РЕШЕТКИ ВИДИМОГО ДИАПАЗОНА**

Приводятся результаты компьютерных расчетов и измерений субволновых дифракционных решеток в видимом диапазоне спектра излучения. Изготовлены субволновые решетки с периодом 400 нм и проведены измерения с использованием лазеров и лазерных диодов, излучающих в видимом диапазоне длин волн.

N.I. PETROV, 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*

## **SUBWAVELENGTH DIFFRACTIVE GRATINGS OF VISUAL RANGE**

The results of the computer calculations and measurements of subwavelength diffraction gratings in the visible spectral range are presented. Subwavelength gratings with a period of 400 nm are fabricated and measurements using lasers and laser diodes emitting in the visible range of wavelengths are carried out.

Интерес к субволновым решеткам растет в связи с их многообещающими применениями в высокоэффективных фильтрах прохождения и отражения [1], в оптоэлектронных устройствах с использованием поверхностных плазмонов [2], спектрально-селективных внешних оптических зеркалах для лазеров (VCSELs) [3]. Субволновые диэлектрические решетки являются альтернативой к распределенным брэгговским многослойным диэлектрическим отражателям для широкополосных высокоотражающих применений при фильтрации излучения. Такие структуры являются компактными и дешевыми в изготовлении и обеспечивают новые возможности для контроля поляризационных свойств излучения. Такие оптические элементы могут использоваться для обработки изображения в изображающих системах, проекционных дисплеях [4], и т.д.



В настоящей работе исследовано влияние различных параметров решетки (скважность, форма и глубина, материал (Ni, Al, Ag, Au, Cu, Mo), угол падения, длина волны и поляризация излучения) на дифракционную эффективность. Показано, что при определенных условиях возникает эффект плазмонного резонанса. Высокая эффективность дифракции в  $-1^{\text{й}}$  порядок наблюдается с увеличением глубины рельефа решетки (более 70% при глубине  $h = 80$  нм).

На рис. 1 представлены результаты расчетов и измерений эффективности дифракции в нулевой порядок в зависимости от угла падения излучения с  $s$  – поляризацией (а) и  $p$ - поляризацией (б). Видно, что имеет место эффект плазмонного резонанса при угле падения  $\sim 33^\circ$ .

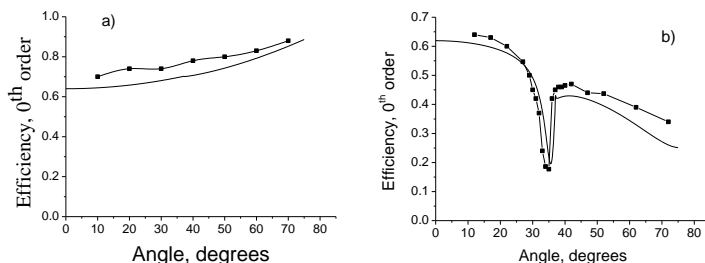


Рис. 1. Вычисленные (сплошные линии) и измеренные эффективности дифракции в нулевой порядок для решетки из никеля  $Ni$  с периодом  $\Lambda = 400$  нм и глубиной  $h = 40$  нм при длине волны излучения  $\lambda = 641$  нм

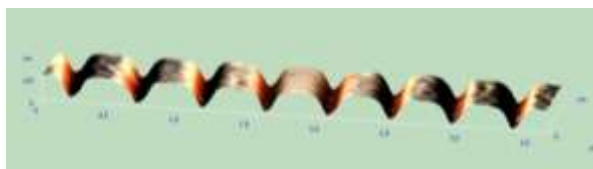


Рис. 2. Изображение профиля решетки, полученное с помощью AFM (NT-MDT)

#### Список литературы

1. Tibuleac T.S., Magnusson R. // J. Opt. Soc. Am. A. 1997. V.14. P.1617.
2. Андреев А.В., Грищенко Ю.В., Добындз М.И. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т.92. С.823.
3. Block S., Gamet E., Pigeon F. // IEEE J. Quantum Electron. 2005. V.41. P.1049.
4. Petrov N.I., Nikitin V.G., Danilov V.A., Popov V.V., Usievich B.A. // Applied Optics. 2014. V.53. P.5740-5744.

**И.В. БОГАЧКОВ, А.И. ТРУХИНА**  
*Омский государственный технический университет*

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ КАНАЛОВ УТЕЧКИ В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ**

В исследовании проведён анализ способов формирования каналов утечки информации из оптических волокон. Рассмотрены вопросы повышения эффективности обнаружения несанкционированного доступа.

**I. V. BOGACHKOV, A. I. TRUKHINA**  
*Omsk State Technical University*

## **INCREASE OF THE DETECTION EFFICIENCY OF LEAK CHANNELS IN OPTICAL FIBERS**

An analysis of the information leakage channels from optical fibers is carried out in research. Questions of efficiency increase of the unauthorized access detection are considered.

В настоящее время волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) получили широкое распространение. Одно из достоинств ВОЛС – их высокая степень защищённости информации от несанкционированного доступа (НСД) [1].

Однако НСД к ВОЛС возможен, хотя по сравнению с другими проводными линиями связи является существенно более сложным и требует больших затрат. При этом для формирования каналов утечки информации необходим непосредственный контакт с оптическим волокном (ОВ).

В исследовании был проведён анализ возможных каналов утечки информации из ВОЛС.

Существуют различные способы съёма информации из ОВ [1, 2]:

1) по способу подсоединения:

- безразрывный,                                    – разрывный,
- локальный,                                        – протяженный;

2) по способу регистрации и усиления:

- пассивные – регистрация излучения с боковой поверхности ОВ;
- активные – регистрация излучения, выводимого через боковую поверхность ОВ с помощью специальных средств, меняющих параметры сигнала в ВОЛС;

– компенсационные – регистрация излучения, выводимого через боковую поверхность ОВ с помощью специальных средств, с последующим формированием и вводом в ОВ излучения, компенсирующего потери мощности при выводе излучения.

Пассивные способы обладают высокой скрытностью, однако для перехвата информации используются участки, на которых уровень бокового излучения повышен. Активные способы позволяют обойти эту проблему, но при этом изменяются параметры распространяющегося в ОВ излучения. Компенсационные методы при хорошей скрытности и эффективности имеют сложность в практической реализации устройств съёма. Следует отметить, что защитные оболочки и элементы конструкции кабеля существенно ослабляют боковое излучение. Поэтому перехват информации любым из вышеперечисленных способов возможен только при нарушении целостности внешней защитной оболочки кабеля и непосредственном доступе к ОВ [2].

Приведенные методы обладают значительным недостатком – изменением уровня обратного рассеяния света в местах каналов утечки, который позволяет определить НСД. С помощью рефлектометрии обратного рассеянного света такие подключения легко обнаруживаются рефлектометром (OTDR) с высокой точностью определения места НСД [3]. Способы съёма информации с ВОЛС развиваются, поэтому для обнаружения НСД на ранней стадии, необходимо своевременное получение достоверной информации о физическом состоянии ОВ.

Исследования спектра рассеяния Манделъштама – Бриллюэна (МБР) показало, что МБР обладает высокой чувствительностью к появлению изгибов и микроизгибов ОВ, чем рассеяние Рэлея, регистрируемое OTDR. Кроме того, именно бриллюэновские рефлектометры (BOTDR) способны обнаруживать участки ОВ даже с незначительным изменением натяжения или температуры. Таким образом, применение BOTDR в системе мониторинга могло бы улучшить защищённость и надёжность работы ВОЛС [3].

#### *Список литературы*

1. Богачков И.В., Майстренко В.А., Трухина А.И. Изучение способов формирования каналов утечки информации в оптических волокнах // Методические вопросы преподавания инфокоммуникаций в высшей школе. 2016. Т.5. №2. С.11-13.

2. Богачков И.В., Трухина А.И. Обзор способов формирования каналов утечки информации в оптических волокнах // Современные проблемы телекоммуникаций: Мат. Рос. науч.-техн. конф. Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2016. С.291-295.

3. Богачков И.В., Горлов Н.И., Трухина А.И. Исследование влияний изгибов оптических волокон на спектр бриллюэновского рассеяния // Сб. докладов I-й Всерос. науч.-практ. конф. «Оптическая рефлектометрия – 2016». Пермь, 2016. С.17-19.

Б.А. КУЗЯКОВ, П.А. ИВАНОВ, А.Е. ПЛОСКИРЕВ,  
Е.А. СКВОРЦОВ

*Московский технологический университет (МИРЭА)*

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО БЛОКА СОГЛАСОВАНИЯ ДЛЯ КОМПЛЕКСИРОВАННЫХ ЛИНИЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ**

На пути совершенствования волоконно-оптического блока согласования для комплексированных линий телекоммуникации, используются конусные световоды с большим диаметром сердцевины на выходном торце. Проведено согласование площади моды на выходном торце световода с площадью фокального пятна телескопической системы.

B.A. KUZYAKOV, P.A. IVANOV, A.E. PLOSKIREV,  
E.A. SKVORTSOV

*Moscow Technological University (MIREA)*

## **PERFECTION FIBER-OPTICAL CONCORDANCE UNIT FOR COMPLEX LINES TELECOMMUNICATIONS**

On the way of perfection of fiber optic concordance unit of complex lines of telecommunication, cone light-pipes are used with the large diameter of core on an output butt end. The concordance of area of fashion is conducted on the fiber output butt end with the area of focal spot of the telescopic system.

В наше время интенсивно разрабатываются и широко применяются оптические комплексированные (ОКТЛ) линии (рис.1) телекоммуникации [1-4]. При сложной трассе всей телекоммуникационной линии и в ряде других случаев применяются волоконно-оптические усилители (ВОУ) и волоконно-оптические согласователи (ВОС) с телескопической системой (ТС). ВОУ интенсивно совершенствуются, наряду с волоконными лазерами, имеющими весьма широкий спектр применений. В ряде проектов нужны повышенные мощности сигнала на выходе модуля передатчика. При этом трудно использовать одномодовые световоды. Это связано с тем, что в одномодовом световоде, даже при относительно небольшой передаваемой мощности, плотность мощности в сердцевине оказывается очень высокой [4]. Так, в одномодовом волокне с диаметром сердцевины 5 мкм, при мощности сигнала 1 мВт, на длине волны 1,55 мкм, плотность мощности в сердцевине превышает  $\sim 5$  кВт/см<sup>2</sup>. Для

получения большой выходной мощности ВОУ можно использовать конусные (КС) световоды с большим диаметром сердцевины [5] на выходном торце (100 мкм и более). При этом плотность мощности в сердцеvine на торце, при упомянутом уровне мощности  $\sim 12 \text{ Вт/см}^2$ , что значительно ниже уровня проявления значимых нелинейных эффектов. В недавних работах было показано, что КС поддерживают одномодовый режим и не требуют применения дополнительной селекции мод. В работе [6] приводятся зависимости ряда параметров ТС от изменения диаметра фокального пятна в диапазоне от  $\sim 20 \text{ мкм}$  - до  $350 \text{ мкм}$ . Они содержат и эффективность световой энергии, которая определяется как отношение доли сконцентрированной энергии в заданную область пространства. Наилучшие результаты согласования получены при равенстве площадей моды на выходном торце КС и фокального пятна ТС. Таким образом, при совершенствовании ВОС применение КС создает ряд преимуществ всей системе.

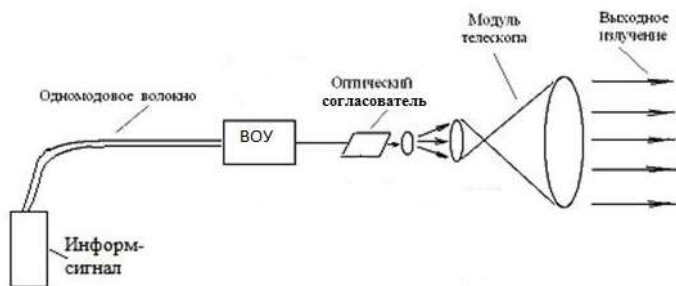


Рис. 1. Перспективный вариант фрагмента ОКТЛ

#### Список литературы

1. Листвин А.В., Листвин В.Н., Швырков Д.В. Оптические волокна для линий связи. М.: Вэлком, 2002.
2. Кузяков Б.А. Оптимизация комбинированной телекоммуникационной системы с волоконными и атмосферными сегментами // Т - Comm. Телекоммуникации и транспорт. 2012. №8. С.41-43.
3. Кузяков Б.А. Оптическая гибридная система передачи информации с вариациями состояний орбитальных угловых моментов фотонов. // 18-я международная НТК «Цифровая обработка сигналов и ее применение - ДСПА – 2016». Сб. трудов. 2016. Ч.3. С.61-65.
4. Wang B.G. Modeling of transient modal instability in fiber amplifiers // Optics Express. 2013. V.21. Is.10. P.12053-12067.
5. Ustimchik V., Kerttula J., Filippov V., Chamorovskii Yu., Okhotnikov O.G. Mode evolution in long tapered fibers with high tapering ratio // Optics Express. 2012. V.20. Is.23. P.25461-25470.
6. Feng Z., Huang L., Gong M. Focal-plane irradiance tailoring using the concept of Woofer-Tweeter deformable mirrors // Optics Express. 2014. V.22. Is.8. P.8871-8879.

П.А. ЧАЙМАРДАНОВ

*Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича***НОВАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОПТИЧЕСКОГО  
УСИЛИТЕЛЯ EDFA НА ОСНОВЕ ВОЛОКНА,  
ЛЕГИРОВАННОГО ИОНАМИ ЭРБИЯ**

В работе предложена новая методика расчета оптического усилителя EDFA, позволяющая существенно сократить время вычислений по сравнению с известными методиками.

P.A. CHAYMARDANOV

*The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications***NEW DESIGN PROCEDURE FOR SOLVING EDFA  
AMPLIFIER BASED ON ERBIUM-DOPED SILICA FIBER**

In this paper present new design procedure for solving EDFA amplifier, which can significantly reduce computation time in comparison with known procedures.

Моделью однокаскадного усилителя EDFA является система дифференциальных уравнений, описывающих распределение по длине  $z$  активного оптического волокна (АОВ) мощностей сигналов  $P_s$ , накачек  $P_p^\pm$  (на длинах волн 1480 и 980 нм) и шумов  $P_{ASE}^\pm$  усиленного спонтанного излучения (ASE) в попутном (+) и встречном (-) направлениях [1]:

$$dP_{p1480}^\pm/dz = \mp P_{p1480}^\pm [a_{12}(1-N_2(z)) - g_{21}N_2(z)] \mp \alpha_{pa1480} P_{p1480}^\pm \quad (1)$$

$$dP_{p980}^\pm/dz = \mp P_{p980}^\pm [a_{13}(1-N_2(z))] \mp \alpha_{pa980} P_{p980}^\pm$$

$$dP_s/dz = P_s [g_{21}N_2(z) - a_{12}(1-N_2(z))] - \alpha_{sa} P_s$$

$$dP_{ASE}^\pm/dz = \pm P_{ASE}^\pm [g_{21}N_2(z) - a_{12}(1-N_2(z))] \pm 2g_{21}N_2(z)h\nu_s\Delta\nu \mp \alpha_{sa} P_{ASE}^\pm$$

$$N_2(z) = (W_{12} + R_{12} + R_{13}) / (W_{12} + R_{12} + W_{21} + R_{21} + R_{13} + 1/\tau)$$

где  $W_{ij}$  и  $R_{ij}$  – вероятности переходов ионов эрбия с уровня  $i$  на  $j$ , зависящие от  $P_s$ ,  $P_p^\pm$  и  $P_{ASE}^\pm$ ,  $a_{12}$ ,  $a_{13}$ ,  $g_{21}$  – коэффициенты поглощения и усиления АОВ,  $h$  – постоянная Планка,  $\nu_s$  – частота сигнала,  $\Delta\nu$  – ширина полосы ASE,  $N_2$  – относительная населенность энергетического уровня 2. Система (1) не может быть решена аналитически, поэтому решается численно. Трудность заключается в том, что традиционные численные

методы требуют задания начальных условий расчета в одной точке, а в данном случае  $P_s$ ,  $P_p^+$  и  $P_{ASE}^+$  известны в начале активного волокна, а  $P_p^-$  и  $P_{ASE}^-$  – в конце АОВ.

Для решения данной проблемы используются методы стрельбы, релаксационные методы [1], генетические алгоритмы [2]. Общим недостатком этих методов является низкая скорость расчета. В данной работе предложена новая методика, существенно сокращающая время вычислений.

Суть методики заключается в следующем. Предположим, что  $N_2$  известна при всех  $z$ , тогда уравнения (1) можно решать независимо друг от друга и задавать начальные условия для каждого из них в любой точке. Методика подразумевает получение функции  $N_2$  при помощи приближений (итераций), результат  $i$ -й итерации обозначим  $N_{2,i}(z)$ :

1. Для  $i = 1$  полагаем, что  $N_{2,i-1}(z)=0$ , а мощности в каждой точке волокна для всех сигналов, накачек и шумов ASE равными  $P_i=0$ .

2. Задаем значения  $P_{s,i}$ ,  $P_{p,i}^+$  и  $P_{ASE,i}^+$  при  $z=0$ .

3. Для каждого  $z \neq 0$  находим  $P_{s,i}$ ,  $P_{p,i}^+$  и  $P_{ASE,i}^+$  из уравнений (1), полагая  $N_{2,i}=0.5(N_2+N_{2,i-1})$ , где  $N_2$  рассчитывается с учетом  $P_{p,i}^-$  и  $P_{ASE,i}^-$ .

4. Задаем значения  $P_{p,i}^-$  и  $P_{ASE,i}^-$  при  $z=L$  ( $L$  – длина АОВ).

5. Для каждого  $z \neq L$  находим  $P_{p,i}^-$  и  $P_{ASE,i}^-$  из уравнения (1), полагая  $N_{2,i}=0.5(N_2+N_{2,i-1})$ , где  $N_2$  рассчитывается с учетом  $P_{s,i}$ ,  $P_{p,i}^+$  и  $P_{ASE,i}^+$ .

6. Если  $i > 1$  и для всех  $P$  выполняются неравенства  $|(P_{i-1}-P_i)/(P_{i-1}+P_i)| \leq \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  – относительная погрешность, то расчет заканчивается. Решением (1) считаются  $N_{2,i}$ ,  $P_{s,i}$ ,  $P_{p,i}^+$  и  $P_{ASE,i}^+$ .

7. Рассчитываем  $N_{2,i-1}(z)=N_2(z)$ . Увеличиваем  $i$  на 1. Возвращаемся к п. 2.

Предлагаемая методика сравнивалась по времени вычислений с известной методикой, представленной в [2]. Расчеты проводились на ПК с четырехядерным процессором AMD A8-6410 (частота 2.4 ГГц). Для 40-канального сигнала в С-диапазоне с шириной канала 1 нм расчет по известной методике занял 1325 с, а по предлагаемой – 3 с.

#### Список литературы

1. Desurvire E. Erbium-Doped fiber amplifiers. Principles and applications. New York: John Wiley & Sons, 1994.
2. Priye V., Singh D.K., Arya S.C. Novel numerical method to model multichannel Erbium-doped Fiber Amplifier // Fiber and Integrated Optics. 2006. 25. P.375-385.

И.В. БОГАЧКОВ, О.Е. КОМПАНЕЕЦ  
*Омский государственный технический университет*

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ  
МАНДЕЛЬШТАМА–БРИЛЛЮЭНА В ОДНОМОДОВЫХ  
ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ С ОСОБЫМИ ПРОФИЛЯМИ**

В исследовании проведён анализ спектров рассеяния Манделъштама–Бриллюэна для оптических волокон различных типов, которые были получены в экспериментах при помощи бриллюэновского рефлектометра.

I.V. BOGACHKOV, O.E. KOMPANEETS  
*Omsk State Technical University*

**RESEARCH OF THE MANDELSTAM–BRILLOUIN  
BACKSCATTERING IN SINGLE-MODE OPTICAL FIBERS  
WITH SPECIAL PROFILES**

An analysis of the Brillouin backscatter spectrum in optical fibers of various types is presented in this research. A Brillouin reflectometer was used in the experiments.

Для обнаружения участков волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) с повышенным натяжением оптических волокон (ОВ) применяются бриллюэновские импульсные рефлектометры (BOTDR) [1-3]. В BOTDR регистрируется и анализируется распределение спектра рассеяния Манделъштама–Бриллюэна (СБР) вдоль ОВ.

Поскольку при бриллюэновской рефлектометрии уровни мощности сигнала, вводимого в ОВ, значительны, представляет особый интерес исследование СБР в ОВ с различными профилями и законами поведения дисперсии. Как известно, ОВ со смещённой дисперсией (DSF – dispersion-shifted single mode fiber) особо чувствительны к нелинейным эффектам [3], что ограничило их применение в ВОЛС, и особо в WDM системах, что привело к появлению ОВ с ненулевой смещённой дисперсией (NZDSF) [1]. Для изучения особенностей СБР в ОВ с различными законами поведения дисперсии были проведены экспериментальные исследования с BOTDR «Ando AQ 8603» при содействии ЗАО «Москабель-Фуджикура».

На рис. 1 приведён профиль СБР для обычного одномодового ОВ (G.652), на рис. 2 – профиль СБР DSF (G.653), а на рис. 3 – профиль СБР NZDSF (G.655). Максимумы СБР отмечены стрелками.



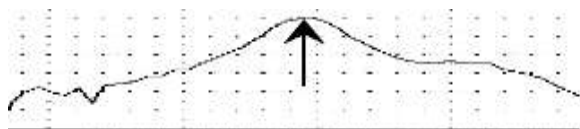


Рис. 1. Профиль СБР для обычного одномодового ОВ (G.652D)

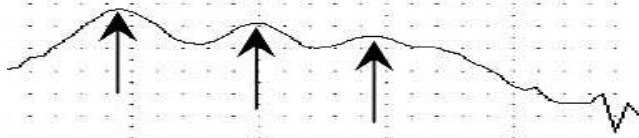


Рис. 2. Профиль СБР для DSF (G.653)

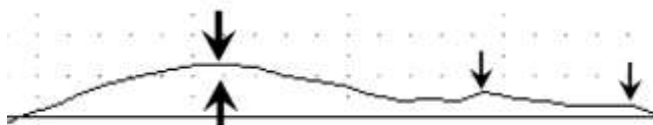


Рис. 3. Профиль СБР для NZDSF (G.655)

Как видно из рис. 2 и 3, профили СБР DSF и NZDSF имеют 3 максимума. По сравнению с профилем DSF "побочные" максимумы NZDSF существенно ослаблены. Первый максимум у DSF в нормальных условиях имеет частоту 10.47 ГГц, второй –10.67 ГГц, третий –10.87 ГГц [3]. Обычно натяжение ОВ анализируется по первому максимуму, при этом «планка» ненапряжённого уровня у DSF оказывается смещённой вниз на 0,8 % по сравнению с обычным ОВ [2]. Оказалось, что NZDSF (G.655) по характеристикам СБР и натяжения занимает промежуточное положение между обычными ОВ (G.652D) и DSF (G.653) [1 – 3].

В дальнейших исследованиях предполагается изучить СБР ОВ специальных типов: "Panda" (ОВ, сохраняющее состояние поляризации), ОВ, легированное эрбием, "дырчатое" ОВ и т. п.

#### *Список литературы*

1. Богачков И.В. Экспериментальные исследования спектра бриллюэновского рассеяния в оптических волокнах с ненулевой смещённой дисперсией при продольных растягивающих силах // Динамика систем, механизмов и машин: Мат. X Межд. IEEE н.-т. конф. Омск, 2016.
2. Богачков И.В. Экспериментальные исследования температурных зависимостей спектра бриллюэновского рассеяния в оптических волокнах различных видов // Динамика систем, механизмов и машин: Мат. X Межд. IEEE н.-т. конф. Омск, 2016.
3. Bogachkov I.V. Researching of features of the Brillouin Backscattering Spectrum in Dispersion-Shifted Optical Fibers // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) 2016. P.1-6. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491694.

**И.В. БОГАЧКОВ**

*Омский государственный технический университет*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ  
БРИЛЛЮЭНОВСКОГО СДВИГА ЧАСТОТЫ  
В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ**

В исследовании проведён анализ температурных зависимостей бриллюэновского сдвига частоты и продольного натяжения для оптических волокон различных типов, которые были получены в экспериментах при помощи бриллюэновского рефлектометра.

**I. V. BOGACHKOV**

*Omsk State Technical University*

**RESEARCH OF TEMPERATURE DEPENDENCES  
OF BRILLOUIN FREQUENCY SHIFT IN OPTICAL FIBERS  
OF DIFFERENT TYPES**

An analysis of temperature dependences of Brillouin frequency shift and strain in optical fibers of various types is presented in this research. A Brillouin reflectometer was used in the experiments.

Спектральные компоненты рассеяния Манделъштама–Бриллюэна в оптических волокнах (ОВ) обладают тем важным для практических применений свойством, что их частота ( $f_B$ ) смещена на величину, пропорциональную степени натяжения и температуре волокна [1 – 3].

Существенное изменение температуры некоторого участка ОВ может сигнализировать о появлении проблем на трассе прокладки оптического кабеля (ОК). Например, повышение температуры участка ОВ может наблюдаться при прорыве теплотрассы около ОК.

Для изучения особенностей спектра рассеяния Манделъштама–Бриллюэна (СБР) в ОВ с различными законами поведения дисперсии были проведены экспериментальные исследования с BOTDR «Ando AQ 8603» при содействии ЗАО «Москабель-Фуджикура».

На рис. 1 приведены полученные температурные зависимости смещения максимума СБР (бриллюэновского сдвига частоты –  $f_B$ ) для различных видов ОВ. При изменении температуры от  $-10\text{ }^\circ\text{C}$  до  $+90\text{ }^\circ\text{C}$   $f_B$  для ОВ–G.652 изменился с 10.8 ГГц до 10.9 ГГц, для NZDSF – от 10.6 ГГц до 10.7 ГГц, а для ОВ–G.657 – от 10.75 ГГц до 10.85 ГГц.

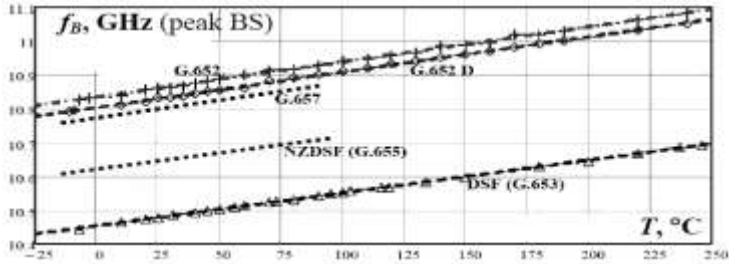


Рис. 1. Температурные зависимости сдвига СБР ( $f_B$ ) для различных видов ОВ

На рис. 2 приведены соответствующие температурные зависимости натяжения (strain) ОВ. Изменения натяжения для ОВ–G.652 соответственно составили от  $-0.02\%$  до  $0.10\%$ , для NZDSF – от  $-0.44\%$  до  $-0.29\%$ , а для ОВ–G.657 – от  $-0.23\%$  до  $-0.08\%$  [1-3].

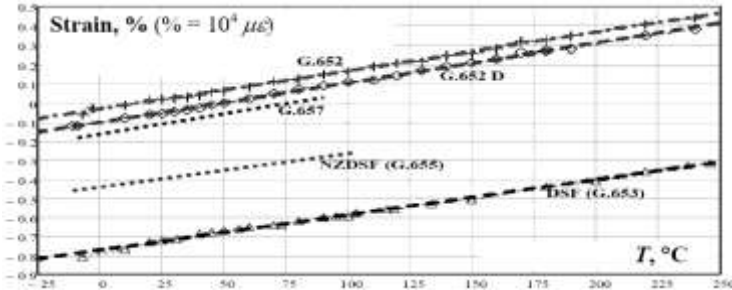


Рис. 2. Температурные зависимости натяжения для различных видов ОВ

Для всех видов ОВ наблюдалась линейная зависимость  $f_B$  и соответствующих характеристик натяжения. Как следует из экспериментов, натяжение NZDSF имеет меньшее смещение СБР в сторону меньших частот, и меньшее отрицательное смещение натяжения, по сравнению с DSF.

Характеристики ОВ-G.657 и ОВ-G.652 отличаются незначительно.

#### Список литературы

1. Богачков И.В., Горлов Н.И. Исследования влияния температурных изменений в оптических волокнах на спектр бриллюэновского рассеяния // Тр. XIII междунар. науч.-техн. конф. ИЕЕЕ АПЭП. Новосибирск, 2016. Т.3. Ч.1. С.105-110.
2. Богачков И.В., Горлов Н.И. Экспериментальные исследования влияния температуры на спектр бриллюэновского рассеяния и характеристики оптических волокон // Вестник СибГУТИ. 2015. Вып.4 (32). С.3-12.
3. Богачков И.В., Горлов Н.И. Обнаружение участков с измененной температурой волоконно-оптических линий связи методом бриллюэновской рефлектометрии // Вестник СибГУТИ. 2015. Вып.4 (32). С.74-81.

**И.В. БОГАЧКОВ**

*Омский государственный технический университет*

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
БРИЛЛЮЭНОВСКОГО СДВИГА ЧАСТОТЫ  
ОТ ПРОДОЛЬНЫХ РАСТЯЖЕНИЙ В ОПТИЧЕСКИХ  
ВОЛОКНАХ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ**

В исследовании проведён анализ зависимостей бриллюэновского сдвига частоты и натяжения при продольных растягивающих силах для оптических волокон различных типов, которые были получены в экспериментах при помощи бриллюэновского рефлектометра.

**I.V. BOGACHKOV**

*Omsk State Technical University*

**EXPERIMENTAL RESEARCH OF BRILLOUIN FREQUENCY  
SHIFT FROM LONGITUDINAL STRETCHING FORCES  
IN OPTICAL FIBERS OF DIFFERENT TYPES**

An analysis of dependences of Brillouin frequency shift and strain from longitudinal stretching forces in optical fibers of various types is presented in this research. A Brillouin reflectometer was used in the experiments.

Для оценки надежности волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) необходимо иметь достоверную информацию о натяжении оптических волокон (ОВ) в них. Одним из эффективных методов определения степени натяжения ОВ является метод бриллюэновской рефлектометрии. Продольная растягивающая сила, приложенная к ОВ, изменяет его модуль Юнга. Зондируя ОВ импульсами и сканируя несущую частоту этих импульсов, можно определить значения бриллюэновского сдвига частоты ( $f_B$ ) вдоль ОВ, и найти распределение натяжения вдоль ОВ [1-3].

Для изучения влияния продольных растягивающих нагрузок на  $f_B$  в ОВ различных видов были проведены экспериментальные исследования с бриллюэновским рефлектометром «Ando AQ 8603» при содействии ЗАО «Москабель-Фуджикура».

При точечном креплении груза в местах растяжения появление асимметрии приводит к микроизгибам, что вызывает существенное

падение интенсивности сигнала за местом растяжения. Эта проблема обсуждалась при анализе результатов более ранних экспериментов [1-3].

Для устранения этих эффектов были приняты меры для предотвращения появления изгибов в месте воздействия, и растягивающая сила действовала на участок исследуемого ОВ только в продольном направлении. На рис. 1 приведены полученные зависимости  $f_B$  для различных видов ОВ при воздействии продольных растягивающих сил. На рис. 2 даны соответствующие зависимости натяжения (strain) ОВ.

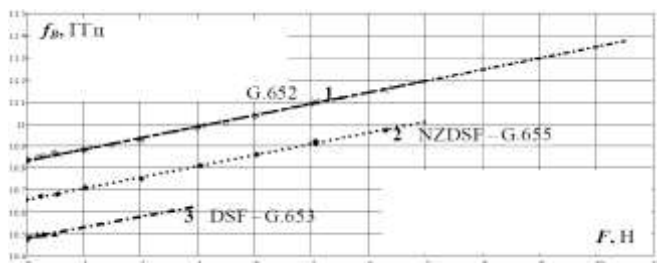


Рис. 1. Зависимости сдвига СБР ( $f_B$ ) от продольной растягивающей силы

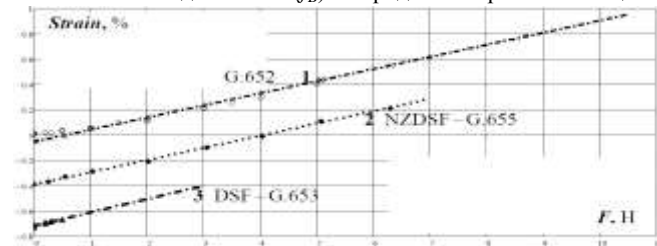


Рис. 2. Зависимости натяжения от продольной растягивающей силы

Для всех видов ОВ наблюдалась линейная зависимость  $f_B$  и соответствующих характеристик натяжения [1-3].

#### Список литературы

1. Богачков И.В., Горлов Н.И. Исследования влияния продольных растяжений оптических волокон на спектр бриллюэновского рассеяния // Тр. XIII междунар. науч.-техн. конф. IEEE APЭП. Новосибирск, 2016. Т.3. Ч.1. С.111-117.
2. Богачков И.В., Горлов Н.И. Экспериментальные исследования влияния продольных растягивающих нагрузок на спектр бриллюэновского рассеяния в оптических волокнах // Вестник СибГУТИ. 2015. Вып.3 (31). С.81-88.
3. Богачков И.В., Горлов Н.И. Обнаружение механически напряженных участков в волоконно-оптических линиях связи на основе анализа спектра бриллюэновского рассеяния // Телекоммуникации. 2015. №11. С.32-38.

**Е.В. РОМАЩУК**

*Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,  
Новосибирск*

## **НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ НА ДАЛЬНИХ РАССТОЯНИЯХ**

Проведен обзор нелинейных эффектов и описаны воздействия каждого нелинейного эффекта на сигнал, пройденный в оптоволокне технологии DWDM.

**Ye.V. ROMASHCHUK**

*Siberian State University of Telecommunications and Informatics, Novosibirsk*

## **NON-LINEAR EFFECTS ON FAR DISTANCES**

The article provides an overview of non-linear effects and describes the impact of each non-linear effect on the signal passed over in fiber DWDM technology.

В современной оптике ожидается появления технологий, позволяющие повысить скорость одного канала до 100 Гбит/с, который называется суперканал, и увеличения числа каналов одном волокне. Сейчас существующие коммерческие DWDM-системы имеют максимальную емкость 9,6 Тб/с, подобные системы производятся всеми мировыми лидерами в производстве телекоммуникационного оборудования. Но с увеличением скорости и числа каналов, а также увеличение дальности сигнала без усиления, разработчики сталкиваются с проблемами нелинейных явлений, возникающих в сигнале при передаче на дальние расстояния. Потому что с повышением интенсивности возникают нелинейные эффекты, заключающиеся в том, что световой сигнал вызывает изменение характеристик волокна, по которому он распространяется, а это, в свою очередь, уже приводит к весьма существенному изменению условий распространения самого сигнала. Эти эффекты не только ухудшают сигнала со временем, но и создают другие сигналы, которые в свою очередь негативно сказываются на качестве передачи. Нелинейные явления разделяются на две категории:

1. Явления, связанные с эффектом Керра, впоследствии вызывая фазовую модуляцию:
  - Фазовая самомодуляция;
  - Фазовая кросс-модуляция;
  - Модуляционная нестабильность;
  - Четырехволновое смещение.

2. Явления стимулированного рассеивания света приводящие к потерям мощности:

- Вынужденное комбинационное рассеяние Рамана:
- Вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна.

Эффект Керра приводит к изменению коэффициента преломления материала под действием электрического поля, что выражается в зависимости показателя преломления от интенсивности излучения, последствии возникающие нелинейные явления, воздействующие на фазовую модуляцию, негативно воздействуют на сигнал в оптоволокне. Явления, связанные с эффектом Керра, влияют на сам сигнал. Для уменьшения этих эффектом применяются разные способы: от улучшенного волокна, которое будет компенсировать явления, до использования многоуровневых модуляций [1].

Явление рассеивания по способу воздействия на световую волну делаться на два типа: вынужденное комбинационное рассеяние Рамана и вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна. Эти рассеяния похожи, поэтому укажем их отличительные особенности влияния на световую волну рассеянного излучения в оптическом волокне: при вынужденном ВРМБ оно распространяется навстречу волне накачки, а при ВКР – в обоих направлениях. Смещение ВРМБ  $\approx 11$  ГГц, а ВКР  $\approx 12$ -15 ТГц зависит от типа волокна. Пороговая мощность накачки при ВРМБ – 10 мВт и ВКР – 1 Вт зависит от ширины её спектра. Таким образом, эти различия обусловлены тем, что при взаимодействии со световой волной, возбуждаются при переходах колебательного состояния, разные фононы, ВРМБ - акустические, а ВКР - оптические [2].

Можно сделать вывод, что действие нелинейных эффектов на световую волну проявляется на дальние расстояния, то есть эти явления необходимо учитывать при постройке линии связи свыше 1000 км, а также необходимость установки устройств, компенсирующих влияние нелинейных эффектов.

#### *Список литературы*

1. Беспрозванных В.Г., Первадчук В.П. Нелинейные эффекты в волоконной оптике // Пермь: Издательство Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2011.

2. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. М.: Мир, 1996.

П.А. ДАНИЛОВ<sup>2</sup>, С.И. КУДРЯШОВ<sup>2</sup>, Е.П. ЛИТОВКО<sup>2,3</sup>,  
С.Ф. УМАНСКАЯ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

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

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

## **РЕАКТИВНОЕ МАГНЕТРОННОЕ НАПЫЛЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАЛЛ-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МЕТАПОВЕРХНОСТЕЙ С ОКОЛОНУЛЕВОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ**

Методом реактивного магнетронного напыления из металлических мишеней серебра и меди при форвакуумной откачке получены оптически-полупрозрачные тонкие пленки композитного металл-диэлектрического материала из наночастиц серебра и оксида меди со средними размерами менее 100 нм, взятых по массе в разных пропорциях. Согласно измерениям оптического отражения и пропускания, полученные метаповерхности обеспечивают околонулевые значения эффективной диэлектрической проницаемости материала в видимом диапазоне.

P.A. DANILOV<sup>2</sup>, S.I. KUDRYASHOV<sup>2</sup>, E.P. LITOVKO<sup>2,3</sup>,  
S.F. UMANSKAYA<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

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

<sup>3</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudnyi

## **REACTIVE MAGNETRON SPUTTERING AND RESEARCH OF METAL-DIELECTRIC METASURFACES WITH EPSILON-NEAR-ZERO**

By the method of reactive magnetron sputtering of metal targets of silver and copper at backing pumping, translucent optical thin film of the composite metal-dielectric material of silver and copper oxide nanoparticles with an average size of less than 100 nanometers are received. According to the measurements of optical reflection and transmission, received metasurface provide near-zero values of the effective permittivity of the material in the visible range.

Оптические метаматериалы – искусственные анизотропные материалы, сконструированные из элементов с субволновыми размерами в одном или нескольких измерениях – в последнее время привлекли широкое внимание в связи с возможностью исследования оптических



эффектов, нехарактерных для природных материалов. К их числу относятся околонулевая диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon$ -near-zero, ENZ). В перспективе, оптические метаматериалы с ENZ-состояниями позволят изучать эффекты невидимости, модуляции, туннелирования, полного пропускания и отражения света, переключения его поляризации. При этом важно, что оптические эффекты могут быть реализованы не для объемных, а для тонкопленочных метаматериалов – метаповерхностей.

Оптически-прозрачные тонкие пленки композитного металл-диэлектрического материала из наночастиц серебра и оксида меди со средними размерами менее 100 нм, формирующих при различных массовых соотношениях этих компонентов метаповерхности с околонулевой эффективной диэлектрической проницаемостью в видимом диапазоне, были получены с помощью реактивного магнетронного напыления. На рис. 1 показаны спектры коэффициентов отражения и пропускания нанокompозитов. Значения минимумов коэффициентов отражения нанокompозитов ( $R_{c1}$ ,  $R_{c2}$ ) в диапазоне 450-500 нм на уровне коэффициента отражения стеклянной подложки  $R_s \approx 0.08$ , что указывает на практически нулевое отражение пленок композитов. Положение минимумов отражения композита смещается в «красную» область спектра – от 460 нм ( $c1$ ) к 490 нм ( $c2$ ) – по мере увеличения доли диэлектрической фазы (оксида меди) в композитах. Нулевое отражение метаповерхностей, построенных на базе нанокompозитов, можно объяснить околонулевыми значениями действительной части диэлектрической проницаемости; при этом специфическое ENZ-состояние в случае серебра в качестве металлической компоненты достигается при небольшом дополнительном сдвиге в «красную» область.

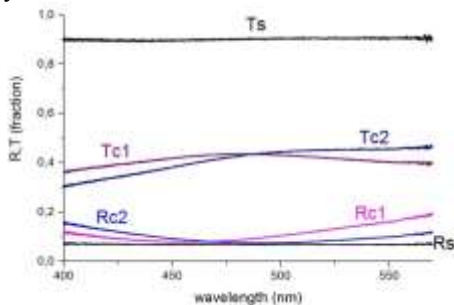


Рис. 1. Спектры коэффициентов отражения (R) и пропускания (T) для стеклянной подложки (s), и для нанокompозитов (c1, время напыления оксида меди – 30 с) и (c2, время напыления оксида меди – 45 с)

А.В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ, Н.А. КУЛЬЧИЦКИЙ<sup>1</sup>,  
С.Н. НЕСМЕЛОВ, С.М. ДЗЯДУХ

*Национальный исследовательский Томский государственный университет  
<sup>1</sup>Московский технологический университет (МИРЭА)*

## **МДП-СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ВАРИЗОННОГО МЛЭ HgCdTe ДЛЯ ИНФРАКРАСНЫХ ДЕТЕКТОРОВ**

В работе исследованы возможности использования МДП-структур на основе МЛЭ  $n\text{-Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$  с приповерхностными варизонными слоями для создания детекторов для спектрального диапазона 8-12 мкм. Установлено, что создание приповерхностного варизонного слоя позволяет увеличить чувствительность МДП-фотодиодов за счет подавления процессов туннельной генерации неосновных носителей заряда в области пространственного заряда.

A.V. VOITSEKHOVSKII, N.A. KULCHITSKY<sup>1</sup>,  
S.N. NESMELOV, S.M. DZYADUKH

*National Research Tomsk State University  
<sup>1</sup>Moscow Technological University (MIREA)*

## **MIS STRUCTURES BASED ON GRADED-GAP MBE HgCdTe FOR INFRARED DETECTORS**

We have studied the possibility of using the MIS structures based on MBE  $n\text{-Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$  with near-surface layers of graded-gap to create detectors for spectral range of 8-12 microns. It is established that the creation of a near-surface graded-gap layer can increase the MIS photodiode responsivity by suppressing the processes of tunneling generation of minority charge carriers in the space charge region.

Полупроводниковый твердый раствор теллурида кадмия и ртути ( $\text{Hg}_x\text{Cd}_x\text{Te}$ ,  $\text{HgCdTe}$ ) давно используется для создания высокочувствительных инфракрасных детекторов из-за своих уникальных фундаментальных свойств [1]. Ширина запрещенной зоны  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  зависит от содержания  $\text{CdTe}$ , что позволяет создать на основе данного материала детекторы для различных спектральных областей, в том числе для спектральных диапазонов окон прозрачности атмосферы 3-5 и 8-12 мкм. Молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ)  $\text{HgCdTe}$  позволяет выращивать пленки с заданным распределением состава по толщине эпитаксиальной пленки, что используется для оптимизации характеристик инфракрасных детекторов. В ИФП СО РАН выращиваются структуры с

приповерхностными варизонными слоями с повышенным содержанием CdTe, которые уменьшают влияние поверхностной рекомбинации на время жизни фотоносителей в объеме пленки HgCdTe [2].

В настоящее время наиболее распространены гибридные матричные фотодетекторы на основе *p-n* или *n-p* фотодиодов из HgCdTe. Одной из проблем при создании МДП-фотодиодов на основе *n*-HgCdTe, являются большие значения туннельных токов генерации неосновных носителей заряда в области пространственного заряда (ОПЗ). Чувствительность МДП-фотодиодов определяется значением произведения дифференциального сопротивления ОПЗ в режиме сильной инверсии на площадь полевого электрода ( $R_{\text{опз}}A$ ).

В данной работе рассмотрены возможности повышения дифференциального сопротивления ОПЗ путем создания приповерхностных варизонных слоев, а также выбора типа альтернативной подложки и типа пассивирующего покрытия. Установлено, что создание приповерхностного слоя с повышенным содержанием CdTe (состав на поверхности составлял 0.42-0.48) позволяет в 3-5 раз увеличить  $R_{\text{опз}}A$  при температуре 77 К и в 40-50 раз при температуре 8 К [3]. При этом в структурах с варизонным слоем значение  $R_{\text{опз}}A$  ограничено процессами генерации Шокли-Рида, что вызывает необходимость снижения дефектности материала. Исследовано влияние типа подложки (GaAs(013) и Si(013)) на значение  $R_{\text{опз}}A$ . Показано, что для МДП-структур на основе варизонного *n*-Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te с  $x=0.21-0.23$  наибольшие значения  $R_{\text{опз}}A$  при 77 К (20-30 Ом×см<sup>2</sup>) и при 10 К (более 300 Ом×см<sup>2</sup>) наблюдаются для структур, выращенных на подложках из GaAs(013) при использовании в качестве диэлектрика SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Для таких структур  $R_{\text{опз}}A$  сопоставимо с аналогичным параметром для структур, выращенных методом МЛЭ на подложках из CdZnTe [4].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области в рамках проекта р\_а № 16-42-700759.

#### *Список литературы*

1. Rogalski A. Infrared detectors. New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011.
2. Сидоров Ю.Г., Дворецкий С.А., Варавин В.С. и др. // ФТП. 2001. Т.35. №9. С.1092.
3. Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Дзядзук С.М. и др. // Известия вузов. Физика. 2014. Т.57. №4. С.102.
4. Goodwin M.W., Kinch M.A., Koestner R.J. // Journal of Vacuum Science & Technology A. 1990. V.8. P.1226.

А.В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ, Н.А. КУЛЬЧИЦКИЙ<sup>1</sup>,  
С.Н. НЕСМЕЛОВ, С.М. ДЗЯДУХ

*Национальный исследовательский Томский государственный университет  
<sup>1</sup>Московский технологический университет (МИРЭА)*

## **ВЛИЯНИЕ ОСВЕЩЕНИЯ НА АДМИТТАНС МДП-СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ВАРИЗОННОГО МЛЭ HgCdTe**

В работе экспериментально исследовано влияние излучения с длиной волны 0.91 мкм на адмиттанс МДП-структур на основе МЛЭ  $n\text{-Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$  с приповерхностными варизонными слоями с повышенным содержанием CdTe, а также без таких слоев. Показано, что излучение существенно влияет на электрофизические характеристики МДП-структур на основе  $n\text{-Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$ .

A.V. VOITSEKHOVSKII, N.A. KULCHITSKY<sup>1</sup>,  
S.N. NESMELOV, S.M. DZYADUKH

*National Research Tomsk State University  
<sup>1</sup>Moscow Technological University (MIREA)*

## **EFFECT OF ILLUMINATION ON ADMITTANCE OF MIS STRUCTURE BASED ON GRADED-GAP MBE HgCdTe**

In this work we have experimentally studied the effect of illumination with a wavelength of 0.91 microns on the admittance of MIS structures based on MBE  $n\text{-Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$  with near-surface graded-gap layers with a high content of CdTe, as well as without such layers. It is shown that illumination significantly affects the electrical characteristics of MIS structures based on  $n\text{-Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$ .

Узкозонный полупроводниковый твердый раствор  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $\text{HgCdTe}$ ), выращенный методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), перспективен для разработки новых типов приборов оптоэлектроники и нанофотоники [1]. Интерес к МДП-структурам на основе  $\text{HgCdTe}$  связан с возможностями создания монолитных инфракрасных сенсоров, а также с необходимостью пассивации поверхности разрабатываемых приборов. Для исследования характеристик МДП-структур часто используют измерения адмиттанса в различных условиях. Дополнительную информацию о физических процессах в структурах могут дать измерения адмиттанса при воздействии оптического излучения [2]. В работе представлены первые результаты исследований адмиттанса при

освещении для МДП-структур на основе МЛЭ  $n\text{-Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$  с приповерхностными варизонными слоями и без таких слоев.

МДП-структуры изготавливались на основе  $n\text{-Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$ , выращенного в ИФП СО РАН методом МЛЭ на подложках из Si (013). Исследовались МДП-структуры на основе системы  $n\text{-Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te} / \text{Al}_2\text{O}_3$  с приповерхностным варизонным слоем и без такого слоя. Измерения проводились в темновом режиме, а также при освещении структуры через подложку излучением с длиной волны 0.91 мкм.

Установлено, что освещение существенно изменяет вид полевых зависимостей емкости и приведенной проводимости в режиме инверсии для структуры с варизонным слоем. Изменение емкости МДП-структуры в режиме инверсии происходит по двум механизмам: уменьшение времени формирования инверсионного слоя за счет появления дополнительного источника неосновных носителей заряда – фотогенерации, увеличение значения емкости в минимуме низкочастотной вольт-фарадной характеристики. Для структуры без варизонного слоя влияние освещения на емкость и проводимость менее заметно из-за низкочастотного вида ВФХ в темновом режиме.

Исследовано влияние освещения на значения дифференциального сопротивления области пространственного заряда (ОПЗ)  $R_{\text{ОПЗ}}$ , емкости ОПЗ  $C_{\text{ОПЗ}}$  и емкость инверсионного слоя  $C_p$ , определенные при помощи метода эквивалентных схем [3, 4] из измерений адмиттанса при разных температурах в режиме инверсии для МДП-структуры на основе  $n\text{-Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$ . Причиной уменьшения  $R_{\text{ОПЗ}}$  при освещении является увеличение генерационного потока дырок за счет фотогенерации. При освещении значение  $C_{\text{ОПЗ}}$  увеличивается, что связано с уменьшением поверхностного потенциала и снижением максимальной ширины ОПЗ за счет появления дополнительных дырок в инверсионном слое. Обнаружено, что глубокие уровни проявляются при освещении для МДП-структур на основе  $n\text{-Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$  без варизонного слоя.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области в рамках проекта р\_а № 16-42-700759.

#### *Список литературы*

1. Kinch M.A. // Journal of Electronics Materials. 2015. V.44. P.2969.
2. Grosvalet J., Lund C. // IEEE Transaction on Electron Devices. 1967. ED-14. P.777.
3. Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M. // Russian Physics Journal. 2016. V.59. P.284.
4. Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Дзядуч С.М. // Известия вузов. Физика. 2016. Т.59. №7. С.8.

П.И. КУЗНЕЦОВ, С.В. АВЕРИН, В.А. ЖИТОВ,  
Л.Ю. ЗАХАРОВ, В.М. КОТОВ

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

## **ФОТОДЕТЕКТОР ВИДИМОЙ ЧАСТИ СПЕКТРА НА ОСНОВЕ СВЕРХРЕШЕТКИ ZnSe/ZnTe**

Создан и исследован МПМ-фотодетектор на основе сверхрешетки ZnSe/ZnTe второго типа. Детектор обладает низкими темновыми токами и высокой чувствительностью. Спектральная характеристика детектора демонстрирует возможность селективного детектирования трех отдельных участков спектра видимого и ближнего инфракрасного излучения.

P.I. KUZNETZOV, S.V. AVERIN, V.A. ZHITOV,  
L.Yu. ZAKHAROV, V.M. KOTOV

*Fryazino branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS*

## **VISIBLE LIGHT PHOTODETECTOR ON THE BASE OF ZnSe/ZnTe SUPERLATTICE**

MSM-photodetector on the base of type-II ZnSe/ZnTe superlattice has been created and investigated. Detector has low dark current and high sensitivity. The spectral characteristic of detector demonstrates the possibility of selective detection of three separate parts of visible and near infrared radiation.

Композиционные сверхрешетки второго типа позволяют реализовать новые возможности при создании оптоэлектронных устройств [1]. Уже созданы фотодетекторы инфракрасного излучения на сверхрешетках второго типа InAs/GaSb, рабочая длина волны которых может меняться при изменении толщины одного или двух слоев сверхрешетки [2]. В настоящей работе мы впервые приводим результаты экспериментальных исследований МПМ-детектора видимой части спектра на сверхрешетке второго типа ZnSe/ZnTe. Гетероструктура (рис. 1) выращена методом МOCVD путем последовательного осаждения ZnSe, ZnTe (12 пар) на s.i. подложке GaAs. Состав и толщины отдельных слоев определены методами рентгеновской дифракции и in situ рефлектометрии, оптические свойства изучены по спектрам фотолюминесценции и отражения. Качество ростовой поверхности оценено с помощью атомно-силовой микроскопии. На выращенной гетероструктуре сформированы

встречно-штыревые контакты МПМ-детектора. Исследования показали, что при напряжении смещения 40 В темновой ток диода составляет  $10^{-12}$  А. Это более чем на два порядка величины меньше, чем у AlGaIn МПМ-детекторов с той же геометрией контактов [3] и сравнимо с темновыми токами МПМ-диодов на основе низкоразмерной гетероструктуры ZnCdS/ZnMgS/GaP [4].

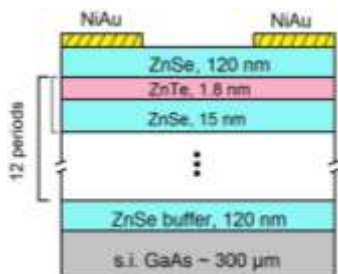


Рис. 1. Структура слоев МПМ-детектора

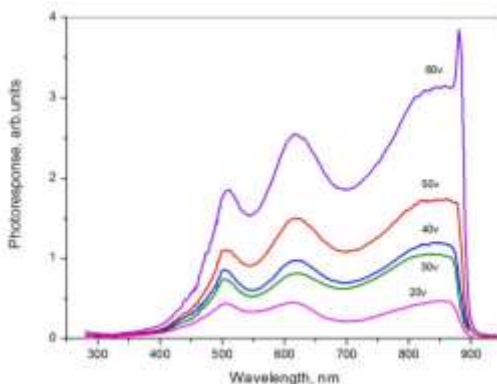


Рис. 2. Спектральный отклик МПМ-детектора

Сверхрешетки второго типа позволяют осуществить сдвиг отклика детектора в более длинноволновый участок спектра в сравнении с исходными полупроводниками, образующими сверхрешетку, что иллюстрирует реальный отклик детектора с максимумом на длине волны 620 нм (рис. 2). Положение максимума сигнала отклика детектора совпадает с максимумом фотолюминесценции сверхрешетки ZnSe/ZnTe. Увеличение смещения с 20 до 50 В дает приращение сигнала фотоотклика детектора без изменения формы спектральной характеристики, а при 60 В приводит к сдвигу максимальной фоточувствительности на длину волны 870 нм с последующим резким спадом. При больших напряжениях смещения удастся исключить блокирующее действие гетеробарьера на границе раздела ZnSe/GaAs и детектор обеспечивает эффективный сбор фотоносителей из низлежащего GaAs.

#### Список литературы

1. Алферов Ж.И. // ФТП. 1998. Т.32. С.1-18.
2. Gautam N., Kim H.S., Kuty M.N., et al. // Appl. Phys. Lett. 2010. V.96. 231107.
3. Averin S.V., Kuznetsov P.I., Zhitov V.A., et al. // Solid State Electronics. 2008. V.52. P.618.
4. Averin S.V., Kuznetsov P.I., Zhitov V.A., et al. // Solid State Electronics. 2015. V.114. P.135.

В.И. ИВАНОВ, Ю.О. ПЕРКОВ

*Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск*

## **ФОТОПРИЕМНИК ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ СЭНДВИЧНОЙ СИСТЕМЫ МЕТАЛЛ-СЕРВЕТОЭЛЕКТРИК-МЕТАЛЛ**

В работе предложен фотоприемник излучения на основе пьезоэлектрического кристалла. Использование одновременно пьезоэлектрического и фотогальванического эффектов позволяет расширить частотный диапазон фотоприемника.

V.I. IVANOV, Yu.O. PERKOV

*Far Eastern State Transport University, Khabarovsk*

## **A PHOTODETECTOR BASED ON THE METAL-FERROELECTRIC-METAL SANDWICH SYSTEM**

The photodetector based on the pyroelectric crystal is proposed. Using the pyroelectric and simultaneously photovoltaic effects allows you to extend the frequency range of a photodetector.

Для получения равномерной частотной зависимости вольт-ваттной чувствительности в данной работе предлагается фотоприемник (ФП), в котором в качестве чувствительного элемента используется кристалл (например, ниобат лития), проявляющий два эффекта: пьезоэлектрический [1] и фотогальванический [2].

Целью данной работы является аналитическое исследование частотной зависимости вольт-ваттной чувствительности предлагаемого ФП.

Рассмотрим фотогальванический и пьезоэлектрический отклики на примере кристалла ниобата лития [3].

Пусть на чувствительный элемент падает поток излучения  $\Phi(t) = A\Phi_0(1 + \cos \omega t)$ , где  $\Phi_0$  – плотность потока излучения,  $\omega$  – частота модуляции излучения,  $A$  – площадь облучаемой поверхности. Принимаем, что толщина кристалла мала ( $\alpha L \ll 1$ ), так что фототок однороден по объему кристалла.

Чтобы получить выражение для вольт-ваттной чувствительности предлагаемого приемника, необходимо получить решение



дифференциального уравнения для выходного сигнала (напряжения на сопротивлении нагрузки  $R_H$ ) в соответствии со схемой замещения.

Уравнение без учета процессов самоиндукции имеет вид:

$$C_{кр} \frac{dU}{dt} + \frac{U}{R_0} = A\gamma \frac{dT}{dt} + J_{фг}, \quad (1)$$

где  $U$  – выходной сигнал на сопротивлении нагрузки,  $C_{кр}$  – емкость кристалла,  $R_0^{-1} = R_{кр}^{-1} + R_H^{-1}$  ( $R_{кр}, R_H$  – сопротивления кристалла и нагрузки, соответственно),  $J_{фг} = \alpha K_G A \Phi(t)$ ,  $K_G$  – константа Гласса,  $T$  – температура кристалла.

Подставляя в (1) решение уравнения теплопереноса, получаем вольт-ваттную чувствительность фотоприемника [1]:

$$S_{\Sigma}^{B-B}(\omega) = \frac{\omega \tau_{\Theta} S_{\phi z}^{B-B}(0)}{(1 + \omega^2 \tau_{\Sigma}^2)^{0.5} (1 + \omega^2 \tau_T^2)^{0.5}} + \frac{S_{\phi z}^{B-B}(0)}{\omega^2 \tau_{\Sigma}^2 + 1}, \quad (2)$$

где  $\tau_T$  – тепловая постоянная времени,  $\tau_{\Theta} = R_0 C_{кр}$  – электрическая постоянная.

Выбирая параметры кристалла (размеры, удельное сопротивление и т.д.) так, чтобы  $S_{\Sigma}^{B-B}(\omega_{\partial}) \approx S_{\phi z}^{B-B}(0)$  в диапазоне  $0 < \omega < \tau_T^{-1}$ , можно достичь постоянной чувствительности, что значительно расширяет возможности использования фотоприемника (в частности, определяет его пригодность для исследования формы сигнала [4-7]).

#### Список литературы

1. Косоротов В.Ф., Кременчугский Л.С., Самойлов В.Б., Щедрина Л.В. Пирозлектрический эффект и его применения. Киев: Наукова думка, 1989.
2. Здоровцев Г.Г., Иванов В.И., Марченков Н.В. // Информатика и системы управления. 2005. №1 (09). С.55-60.
3. Иванов В.И., Карпец Ю.М., Климентьев С.В. Термостимулированные токи в несимметричной сэндвичной структуре металл-сегнетоэлектрик-металл: монография. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2007.
4. Здоровцев Г.Г., Иванов В.И., Карпец Ю.М., Климентьев С.В. // Известия Томского политехнического университета. 2007. Т.311. №2. С.102-105.
5. Иванов В.И., Климентьев С.В., Корчевский В.В. // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2010. №2. С.013-018.
6. Здоровцев Г.Г., Иванов В.И., Климентьев С.В., Криштоп В.В. // Известия вузов. Приборостроение. 2006. Т.49. №8. С.45-46.
7. Ivanov V.I., Karpets Yu.M., Kliment'ev S.V. // Russian Physics Journal. 2001. V.44. №1. P.119-121.

Н.М. ГАНЖЕРЛИ, С.Н. ГУЛЯЕВ<sup>1</sup>, И.А. МАУРЕР

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург  
<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

## **СОЗДАНИЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ СТРУКТУР НА КОМПОЗИТЕ ИЗ БИХРОМИРОВАННОГО ЖЕЛАТИНА И ОРГАНИЧЕСКОГО ПОЛИМЕРА**

Представлены результаты экспериментов по воздействию коротковолнового УФ излучения на голографические структуры, зарегистрированные на тонких слоях бихромированного желатина (БХЖ). Продемонстрирована возможность переноса структуры голограммных оптических элементов на подложку из органического полимера - полиметилметакрилата.

N.M. GANZHERLI, S.N. GULYAEV<sup>1</sup>, I.A. MAURER

*Ioffe physical-technical institute of the RAS, Saint-Petersburg  
<sup>1</sup>Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University*

## **CREATION OF HOLOGRAPHIC STRUCTURES ON DICHROMATED GELATIN - ORGANIC POLYMER COMPOSITE**

Results of the experiments on the effect of short-wave UV radiation on holographic patterns recorded on thin layers of dichromated gelatin (DCG) are presented. The possibility of the transfer of holographic optical element structure onto an organic polymer substrate (polymethylmethacrylate) is demonstrated.

Облучение УФ излучением как толстых [1], так и тонких слоев БХЖ с записанными на них голографическими решетками приводит к десятикратному увеличению высоты поверхностного рельефа. На сверхтонких слоях впервые реализованы голографические решетки с пространственной частотой  $100 \text{ мм}^{-1}$ , для которых дифракционная эффективность приближается к теоретическому пределу для тонких рельефно-фазовых голограмм. Повторное воздействие коротковолнового УФ излучения на полученные рельефно-фазовые структуры позволяет плавно и контролируемо уменьшать их толщину. Показано, что для сверхтонких решеток впадины рельефа при повторном облучении УФ светом могут доходить до подложки, создавая окна в слое БХЖ. Возникает возможность через такие окна воздействовать коротковолновым УФ излучением на материал подложки с целью

получения поверхностного рельефа непосредственно на подложке и перенести голографическую структуру на любую подходящую среду, обладающую высокими оптическими характеристиками. В качестве материала подложки подходит любой органический полимер, на который коротковолновое УФ излучение оказывает деструктивное воздействие.

В данной работе слои БХЖ создавались на подложке из полиметилметакрилата. Зарегистрированные решетки облучались УФ излучением и купались в воде для вымывания разрушенных участков слоя БХЖ. Этот цикл повторялся до тех пор, пока слой БХЖ не становился настолько тонким, чтобы УФ излучение воздействовало через образовавшиеся окна в БХЖ на материал подложки. Рис. 1 демонстрирует возможность контролируемого изменения средней толщины слоя БХЖ  $T_{\text{avg}}$  с помощью засветки УФ излучением (1-я засветка – 24 мин, 2-я – 40 мин). После третьей засветки (68 мин) слой БХЖ был механически удален с поверхности оргстекла после предварительного размачивания в горячей воде с температурой 45°C.

Исследование с помощью микроинтерферометра МИИ-4 голографических решеток, полученных на поверхности полиметилметакрилата, показало, что высота рельефа составила величину порядка 1,5 мкм (рис. 2). Эксперименты подтвердили возможность успешного переноса рельефной структуры со слоя БХЖ на органический полимер.

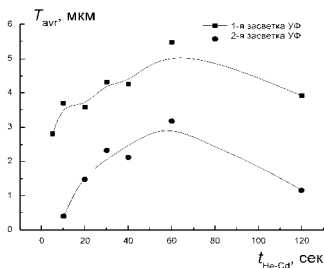


Рис. 1. Средняя толщина слоя БХЖ  $T_{\text{avg}}$  от времени экспонирования He-Cd лазером  $t_{\text{He-Cd}}$

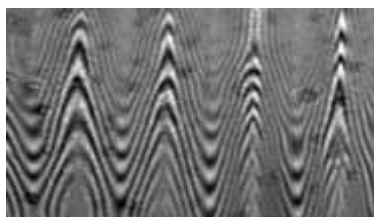


Рис. 2. Интерферограмма поверхности подложки, полученная с помощью микроинтерферометра МИИ-4

#### Список литературы

1. Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н., Маурер И.А. Влияние УФ-излучения на свойства дифракционных решеток на бихромованном желатине // Письма в ЖТФ. 2016. Т.42. Вып.19. С.26-30.

В.В. МОГИЛЬНЫЙ<sup>1</sup>, А.И. СТАНКЕВИЧ<sup>1</sup>, А.В. ТРОФИМОВА<sup>1</sup>,  
В.С. БЕЗРУЧЕНКО<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск

<sup>2</sup>Институт химии новых материалов НАН Беларуси, Минск

## **ФОТОНАВЕДЕННАЯ ПЛАНАРНАЯ ОРИЕНТАЦИЯ ЖК НА СЛОЯХ БЕНЗАЛЬДЕГИДНЫХ ПОЛИМЕРОВ С ДЛИННЫМИ БОКОВЫМИ АЛКИЛЬНЫМИ ЦЕПЯМИ**

Экспериментально изучено формирование ориентированных пленок ЖК мономера на поверхности слоев бензальдегидных полимеров, включающих длинные ( $\sim C_{12}$ ) алкильные боковые группы. Показано, что фотостимулированная ориентация мезогена после натирания слоя и последующего неполяризованного УФ облучения деградирует практически полностью в области экспозиционных доз, соответствующих развитию фотоориентации при облучении линейно-поляризованным светом. Деградация связывается с конкуренцией примерно равных вкладов в ориентацию основных полимерных цепей и фотопродуктов бензальдегидных групп.

U. V. MAHILNY<sup>1</sup>, A. I. STANKEVICH<sup>1</sup>, A. V. TROFIMOVA<sup>1</sup>,  
V. S. BEZRUCHENKO<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State University, Minsk

<sup>2</sup>Institute of Chemistry of New Materials, NAS Belarus, Minsk

## **PHOTOINDUCED PLANAR LC ALIGNMENT ON THE LAYERS OF BENZALDEHYDE POLYMERS CONTAINING LONG ALKYL SIDE CHAINS**

Formation of reactive mesogen oriented films on the layers of benzaldehyde polymers comprising long ( $\sim C_{12}$ ) alkyl side groups has been studied experimentally. It is shown that the photostimulated rubbing alignment is degraded almost completely at the exposure dose of non-polarized UV irradiation that corresponds to the development of photoalignment under irradiation with linearly polarized light. The degradation is associated with competition of approximately equal contributions to the orientation of the main polymer chains and photoproducts of benzaldehyde groups.

Бензальдегидсодержащие полимеры (БП) обладают рядом практически значимых свойств, в частности, способностью ориентировать ЖК в результате воздействия на полимерные слои механического натирания и последующего УФ облучения (фотостимулированная ориентация) или при действии линейно-поляризованного УФ излучения (фотоориентация).

Включение в БП длинных боковых алкильных групп открывает возможность применения полимеров в качестве ориентантов с локально задаваемым углом преднаклона [1]. Как правило, фотоориентация на слоях БП гораздо слабее фотостимулированной ориентации после натирания [2]. Так, при ориентации ЖК мономера (ЖКМ) на БП без длинных алкильных групп удается достичь величины двулучепреломления ( $dn$ ) ЖКМ  $\sim 0,07$ , тогда как при фотостимулированной ориентации для этого ЖКМ достигается максимально возможное значение  $dn = 0,2$  [2]. Однако присутствие в БП длинных алкильных групп сильно уменьшает азимутальную энергию сцепления для фотостимулированной ориентации [3].

В настоящей работе исследована ориентация ЖКМ слоями многокомпонентного БП, содержащего в своей цепи фрагменты с боковыми алкильными заместителями ( $\sim C_{12}$ ). Введение этих заместителей приводит к заметному снижению температуры стеклования полимера и увеличению подвижности полимерных цепей. При фотостимулированной ориентации параметр качества ( $Q$ ) и величина  $dn$  ЖКМ с ростом времени экспонирования БП слоя после натирания проходят через максимум и уменьшаются почти до 0 (рис. 1, кривые 1,2). Фотоориентация вызывает монотонное нарастание  $Q$  до 1 и  $dn$  до 0,14 в области времен облучения, где фотостимулированная ориентация деградирует. Это позволяет связать деградацию с конкуренцией примерно равных вкладов в ориентацию основных цепей полимера и фотопродуктов боковых бензальдегидных групп.

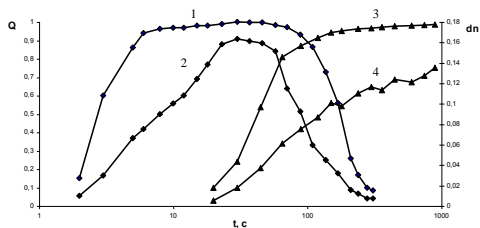


Рис. 1. Зависимости параметра качества (1,3) и двулучепреломления ЖКМ слоев (2,4), ориентированных слоями БП, от времени облучения ориентирующего слоя для фотостимулированной ориентации (1,2) и фотоориентации (3,4)

#### Список литературы

1. Bezruchenko V.S., et al. // Molecular Crystals and Liquid Crystals. 2016. V.626. №1. P.222-228.
2. Mahilny U.V., et al. // Physics Procedia. 2015. V.73. P.121-125.
3. Безрученко В.С. и др. // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2016. Т.16. №.1. С.38-41.

И.Н. ШКУРАК<sup>1</sup>, А.С. СЕЛЮКОВ<sup>1,2</sup>, А.Г. ВИТУХНОВСКИЙ<sup>1,2</sup>,  
А.А. ИСАЕВ<sup>2</sup>, В.М. КОРШУНОВ<sup>2,3</sup>, Р.Б. ВАСИЛЬЕВ<sup>4</sup>

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

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

<sup>3</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

<sup>4</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

## ФОТОИНДУЦИРОВАННАЯ НЕЛИНЕЙНОСТЬ В КОЛЛОИДНЫХ РАСТВОРАХ ПЛАНАРНЫХ И СФЕРИЧЕСКИХ НАНОКРИСТАЛЛОВ CdSe

Проведено исследование фотоиндуцированной нелинейности в коллоидном растворе планарных нанокристаллов CdSe (нанопластин), а также сравнение со сферическими нанокристаллами CdSe (квантовыми точками). Полученные величины нелинейной добавки к показателю преломления составили  $\Delta n_{\text{NPLs}}=1.2 \cdot 10^{-2}$  и  $\Delta n_{\text{QDs}}=1.4 \cdot 10^{-2}$ , соответственно. Наблюдаемый эффект объяснён образованием фотоиндуцированных носителей заряда, а различия – разной скоростью диффузии для нанопластин и квантовых точек в растворе.

I.N. SHKURAK<sup>1</sup>, A.S. SELYUKOV<sup>1,2</sup>, A.G. VITUKHNOVSKY<sup>1,2</sup>,  
A.A. ISAEV<sup>2</sup>, V.M. KORSHUNOV<sup>3</sup>, R.B. VASILIEV<sup>4</sup>

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

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

<sup>3</sup>Bauman Moscow State Technical University

<sup>4</sup>Lomonosov Moscow State University

## PHOTOINDUCED NONLINEARITY IN COLLOIDAL SOLUTIONS OF PLANAR AND SPHERICAL CdSe NANOCRYSTALS

Photoinduced nonlinearity in colloidal solution of planar CdSe nanocrystals (nanoplatelets) is investigated and compared to that of spherical CdSe nanocrystals (quantum dots). The obtained values of a nonlinear addition to the refractive index are  $\Delta n_{\text{NPLs}}=1.2 \cdot 10^{-2}$  and  $\Delta n_{\text{QDs}}=1.4 \cdot 10^{-2}$ , respectively. The observed effect is attributed to generation of photoinduced charge carriers and the difference is related to different diffusion rates for nanoplatelets and quantum dots in the solution.

Нелинейность прозрачной керровской среды имеет место только при высоких интенсивностях оптических пучков с фемто- и пикосекундной длительностью импульсов, что позволяет наблюдать только быстротекающие процессы. Таким образом, из рассмотрения

исключаются нелинейные процессы с большими временами релаксации, обусловленные, например, диффузией. Эти процессы происходят в поглощающих средах и связаны с накоплением нелинейности и постепенным изменением нелинейного показателя преломления  $n_2$ [1]. Следовательно, высокие значения нелинейности можно получить за счёт увеличения времени её накопления, а не мощности лазерных импульсов.

Целью данной работы являлось исследование нелинейно-оптического отклика коллоидного раствора нанопластин CdSe, а также его сравнение с квантовыми точками CdSe. Средний диаметр сферических наночастиц составлял 2.1 нм, характерные продольные размеры плоских нанокристаллов: 70-200 нм, а толщина – 1.2 нм.

Нелинейно-оптический отклик планарных и сферических наночастиц CdSe был исследован методом абберационного самовоздействия [2]. Была получена зависимость нелинейного фазового сдвига от времени с начала освещения образца лазерным пучком и рассчитаны значения нелинейной добавки к показателю преломления  $\Delta n$ . Характерные времена накопления нелинейности составили  $\tau_{st} \sim 300$  мс как для нанопластин, так и для квантовых точек, а нелинейная добавка –  $\Delta n_{NPLs} = 1.2 \cdot 10^{-2}$  и  $\Delta n_{ODs} = 1.4 \cdot 10^{-2}$ , соответственно. Нелинейный эффект был объяснён образованием фотоиндуцированных носителей заряда. При освещении объёма коллоидного раствора с наночастицами в них генерируются носители зарядов, релаксация которых происходит с характерными временами порядка единиц-десятков наносекунд. Часть носителей заряда не успевает рекомбинировать и попадает в локализованные состояния с субсекундным временем релаксации. Этот факт подтверждают исследования «мерцания» одиночных сферических квантовых точек при их непрерывном освещении [3]. С другой стороны, уже было продемонстрировано, что мерцание флуоресценции для планарных и сферических нанокристаллов носит схожий характер [4], при этом характерные on/off интервалы составляют порядка сотен миллисекунд, что соответствует наблюдаемым временам. Небольшие различия в величине  $\Delta n$  для нанопластин и квантовых точек объясняются меньшей скоростью диффузии первых из области освещения ввиду их больших размеров.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 15-02-05856 А, 16-29-11805 офи\_м и 16-02-00594 А.

#### *Список литературы*

1. Isaev A. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2013. V.46 (26). P.215301.
2. Akhmanov S.A., Sukhorukov A.P., Khokhlov R.V. // Sov. Phys. Usp. 1968. V.10. P.609.
3. Li S., Steigerwald M.L., Brus L.E. // ACS nano. 2009. V.3 (5). P.1267.
4. Tessier M.D., Javaux C., Maksimović I., et al. // ACS nano. 2012. V.6 (8). P.6751.

М.В. БОЖЕНКО, А.Б. РАСИН, Е.А. ЧУСОВИТИН, Д.Т. ЯН<sup>1</sup>

*Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток  
<sup>1</sup>Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск*

## **ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ, СФОРМИРОВАННОГО НА ПОДЛОЖКАХ, ОБРАБОТАННЫХ ПЛАЗМОЙ**

Проведены измерения спектров фотолюминесценции образцов пористого кремния после обработки компрессионным плазменным потоком в атмосфере азота. Обнаружен значительный рост фотолюминесценции исследуемых образцов по сравнению с пористым кремнием, полученным по обычной методике.

M.V. BOZHENKO, A.B. RASIN, E.A. CHUSOVITIN, D.T. YAN<sup>1</sup>

*Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok  
<sup>1</sup>Far Eastern State Transport University, Khabarovsk*

## **PHOTOLUMINESCENCE PROPERTIES OF POROUS SILICON FORMED ON THE PLASMA-TREATED SUBSTRATE**

Measurements of the photoluminescence spectra of porous silicon samples after treatment with compression plasma flows in a nitrogen atmosphere are carried out. We found a significant increase of the photoluminescence of the samples as compared with the porous silicon obtained in the usual method.

Известно, что в результате анодного травления при малых плотностях тока (менее 20 мА/см<sup>2</sup>) на поверхности кристаллического кремния образуется пористый кремний (ПК) с размерами кристаллитов менее 10 нм. Образующийся материал представляет собой структуру, отличную от подложки, имеет собственные электрические и оптические характеристики и обладает фотолюминесценцией в видимом диапазоне [1-4].

В данной работе рассматривается способ воздействия на поверхность монокристаллического кремния с помощью компрессионного потока плазмы азота. Генерация компрессионных плазменных потоков происходит в магнитоплазменном компрессоре (МПК) компактной геометрии (рис. 1) [5]. При разряде магнитоплазменного компрессора вблизи поверхности подложки, там, где пересекаются потоки плазмы, формируется область ударно-сжатой плазмы, обладающей высоким давлением и температурой. Примерная температура плазмы составляет



1400° С, что приблизительно равно температуре плавления кремния. В силу кратковременного воздействия (порядка 100 мс) приповерхностный слой кремния успевает расплавиться. Толщина расплавленного слоя составляет порядка нескольких микрон. После этого происходит быстрое остывание и кристаллизация расплава. В результате на поверхности образуются различные субмикронные структуры, пример которых приведен на рис. 2.

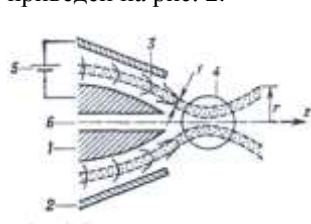


Рис. 1. Схема МПК:  
1 - внутренний электрод,  
2 - внешний электрод,  
3 - плазменный поток,  
4 - область компрессии,  
5 - источник питания,  
6 - деверторный канал

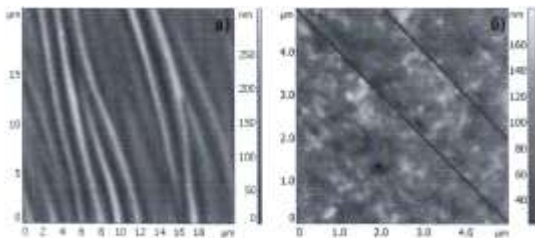


Рис. 2. АСМ изображения поверхности кремния (КДБ-1): после её обработки компрессионным плазменным потоком (а), после анодного травления (б)

В результате исследования структур на основе пористого кремния, обработанных компрессионным плазменным потоком, обнаружен значительный рост интенсивности ФЛ в видимой области по сравнению с образцами пористого кремния без дополнительной обработки. Установлено, что состояние поверхностных связей играет важную роль в процессе фотолуминесценции пористого кремния.

#### Список литературы

1. Canham L.T. Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers // Appl. Phys. Lett. 1990. V.57. P.1046-1048.
2. Barbagiovanni E.G., Lockwood D.J., Simpson P.J., Goncharova L.V. Quantum confinement in Si and Ge nanostructures // Appl. Phys. Rev. 2014. 1, 011302.
3. Лазарук С.К., Лешок А.А., Жагуро П.В., Борисенко В.Е. Светоизлучающие диоды на основе пористого кремния // Доклады БГУИР. 2004. №3. С.27-37.
4. Lee M.-K., Chu C.-H., Wang Y.-H., Sze S.M. 1.55- $\mu\text{m}$  and infrared-band photoresponsivity of a Schottky barrier porous silicon photodetector // Optics letters. 2001. V.26. №3. P.160-162.
5. Анищик В.М., Углов В.В., Пунька А.В., Асташинский В.В., Квасов Н.Т., Данилюк А.Л., Асташинский В.М., Ананин С.И., Аскерко В.В., Костюкевич Е.А., Кузьмицкий А.М. Использование механизмов формирования объемных регулярных структур на поверхности кремния при воздействии импульса компрессионной плазмы // Перспективные материалы. 2003. №5. С.5-11.

В.Р. СОЛОВЕЙ<sup>1</sup>, А.С. СЕЛЮКОВ<sup>1,2</sup>, А.Г. ВИТУХНОВСКИЙ<sup>1,2</sup>,  
Р.Б. ВАСИЛЬЕВ<sup>3</sup>, Е.П. ЛАЗАРЕВА<sup>3</sup>

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

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

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

## **ФОТОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОКРИСТАЛЛОВ CdTe ПЛАНАРНОЙ ГЕОМЕТРИИ ВО ВНЕШНЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ**

Исследованы спектры фотолюминесценции и релаксация фотолюминесценции планарных нанокристаллов CdTe во внешнем электрическом поле. Обнаружено, что влияние электрического поля на нанокристаллы является полностью обратимым. Продемонстрировано управляемое полем восстановление экситонов в планарных нанокристаллах.

V.R. SOLOVEY<sup>1</sup>, A.S. SELYUKOV<sup>1,2</sup>, A.G. VITUKHNOVSKY<sup>1,2</sup>,  
R.B. VASILIEV<sup>3</sup>, E.P. LAZAREVA<sup>3</sup>

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

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

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

## **PHOTOPHYSICAL PROPERTIES OF PLANAR CdTe NANOCRYSTALS IN ELECTRIC FIELD**

Photoluminescence spectra and photoluminescence decays are studied for planar CdTe nanocrystals in an external electric field. It is found that the influence of the electric field on the nanocrystals is completely reversible. Field-controlled restoration of excitons in the planar nanocrystals is demonstrated.

Коллоидные полупроводниковые нанокристаллы, являются одним из перспективных материалов для изготовления оптоэлектронных и нанофотонных устройств, благодаря узким линиям люминесценции, малым временам релаксации люминесценции и высокой химической стабильности. Они успешно применялись для изготовления различных оптоэлектронных устройств [1, 2], но влияние электрического поля на их свойства рассмотрено не достаточно подробно.

Целью данной работы было изучение фотолюминесценции планарных нанокристаллов CdTe (латеральные размеры 80-100 нм и толщина 1.9 нм [3]) во внешнем электрическом поле величины 0-90 кВ/см.

Обнаружено (рис. 1) падение интенсивности фотолюминесценции нанопластин CdTe на 13% при повышении поля до 80 кВ/см и обратимость эффекта при понижении до 0 кВ/см (диссоциация экситонов во внешнем электрическом поле). При снятии внешнего воздействия, наблюдался рост интенсивности относительно изначальной на 5% (после снятия воздействия в системе присутствуют остаточные носители заряда). Релаксация фотолюминесценции впервые показала управляемое полем восстановление экситонов в планарных нанокристаллах. Обнаружено (рис. 2), что доля «быстрых» фотонов (в интервале 1 – 40 нс) растет в 2 раза с увеличением поля от 0 до 80 кВ/см. Предположительно, дополнительные фотоны появляются за счет блокировки полем процесса захвата носителей зарядов в ловушки с последующим восстановлением экситонов и рекомбинацией на микросекундных временных масштабах.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 15-02-05856 А, 16-29-11805 офи\_м и 16-02-00594 А.

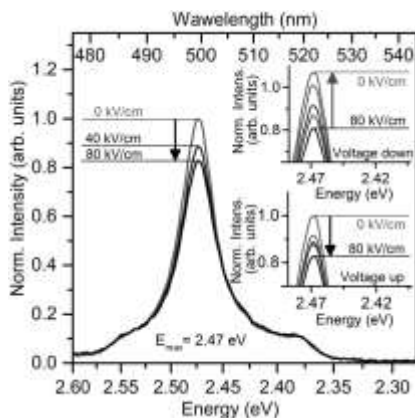


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции нанопластин CdTe во внешнем электрическом поле

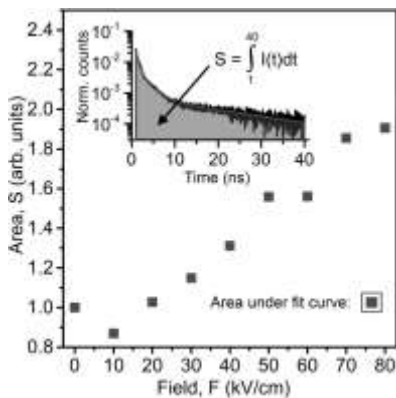


Рис. 2. Зависимость интеграла под кривыми релаксации фотолюминесценции от величины внешнего электрического поля

#### Список литературы

1. Vashchenko A.A., Lebedev V.S., et al. // JETP Lett. 2012. V.96 (2). P.118.
2. Vashchenko A.A., Vitukhnovsky A.G., et al. // JETP Lett. 2014. V.100 (2). P.94.
3. Mahler B., Nadal B., et al. // Chem. Mater. 2013. V.25 (12). P.2455.

А.Р. АСАДУЛЛИНА<sup>1</sup>, С.С. ХАРИНЦЕВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Казанский федеральный университет*

<sup>2</sup>*Институт перспективных исследований АН Республики Татарстан, Казань*

## **ФОТОИНДУЦИРОВАННЫЕ ПОВЕРХНОСТНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ ТОНКИХ ПЛЕНОК АЗОПОЛИМЕРА**

В данной работе представлены результаты экспериментального и теоретического исследования поверхностных деформаций тонкой пленки азополимера, возникающих под действием лазерного излучения с линейной, радиальной и азимутальной поляризациями. Результаты численного моделирования и экспериментальных данных согласуются удовлетворительно друг с другом. Это позволяет использовать фоточувствительные азобензольные пленки для визуализации структуры лазерного поля с произвольной поляризацией.

A.R. ASADULLINA<sup>1</sup>, S.S. KHARINTSEV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Kazan federal university*

<sup>2</sup>*Institute of Perspective Researches of Tatarstan Academy of Sciences, Kazan*

## **PHOTOINDUCED SURFACE DEFORMATION OF AZOPOLYMER THIN FILMS**

This paper is devoting to experimental and theoretical studies of surface deformation of azobenzene thin films exposed to laser beams with linear, radial and azimuthal polarizations. Numerical simulations and experimental data are satisfactorily consistent with each other and, therefore, they can be used for visualizing a laser field structure with an arbitrary polarization.

Результаты исследования деформации тонких пленок азополимеров для случая лазерных пучков с линейной и круговой поляризацией были представлены в работе [1]. В данной работе исследуется влияние лазерных пучков с азимутальной и радиальной поляризацией.

В экспериментальной части данного исследования на поверхность азополимера фокусировались лазерные пучки с различными типами поляризации: линейной по оси X и по оси Y, азимутальной и радиальной. Для получения двух последних поляризаций на полуволновую S-пластинку подавалось линейно-поляризованное лазерное излучение (по оси X и по оси Y). После прохождения пластинки, свет фокусировался линзой на пленку азополимера. Деформированные поверхности

исследовались с помощью атомно-силового микроскопа, полученные топографии представлены на рис. 1a, 1b, 1c, 1d.

В [1] показано, что сила, действующая на молекулы азополимера определяется выражением  $f(r) = \langle [P(r,t) \cdot \nabla] E(r,t) \rangle$ , где  $P(r,t)$  – поляризуемость среды. Тогда поверхность, деформированная под действием этой силы:  $S(x, y, t) \sim [\nabla_S \cdot f]_Z \cdot t$ , где  $t$  – время экспозиции. Смоделированные поверхности для линейных поляризаций представлены на рис. 1e и рис. 1f. Для нахождения полей, прошедших через S-пластинку, был использован метод матриц Джонса:  $\bar{E}_{out} = M \cdot \bar{E}_{in}$ , где  $M$  – матрица полуволновой пластинки [2]. Вычисленные поверхности, деформированные этими полями, представлены на рис. 1g и рис. 1h.

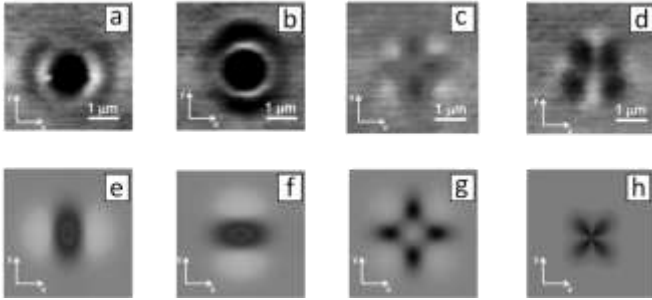


Рис. 1. АСМ поверхностных деформаций, вызванных лазерным пучком с линейной по X (a); линейной по Y (b); азимутальной (c) и радиальной (d) поляризациями; смоделированные поверхностные деформации для гауссова пучка с линейной по X (e); линейной по Y (f); азимутальной (g) и радиальной (h) поляризациями

Сходимость экспериментально полученных поверхностей с вычисленными, свидетельствует о том, что данные вычисления могут быть использованы для моделирования поверхностных деформаций, возникающих под действием лазерных пучков высокого порядка. В дальнейшем авторами будет изучена возможность применения результатов данной работы для определения поляризации ближнего поля в сканирующей ближнепольной оптической микроскопии.

#### Список литературы

1. Bian S., Williams J.M., Kim D.Y., et al // Journal of Applied Physics. 1999. V.86. P.4498.
2. Kazansky P.G., et al // Optical materials express. 2011. V.1. №4. P.783.

Д.А. КОМИССАР<sup>1</sup>, А.С. СЕЛЮКОВ<sup>1,2</sup>, А.Г. ВИТУХНОВСКИЙ<sup>1,2</sup>,  
Р.Б. ВАСИЛЬЕВ<sup>3</sup>, Н.С. КУРОЧКИН<sup>1,2</sup>, В.Р. СОЛОВЕЙ<sup>1</sup>

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

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

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

## ФЁРСТЕРОВСКИЙ ПЕРЕНОС ЭНЕРГИИ В ОРГАНИЧЕСКОМ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩЕМ ДИОДЕ С ПЛАНАРНЫМИ НАНОКРИСТАЛЛАМИ CdSe

Исследованы скорости передачи экситонного возбуждения от органических транспортных слоев TAZ и TPD активному излучающему слою планарных нанокристаллов CdSe в органическом светоизлучающем диоде. Показано, что при условии равноудаленности молекул-доноров от слоя нанокристаллов CdSe, передача энергии от TPD этому слою более эффективна. При этом характерные скорости передачи составили  $K_{TPD-CdSe} = 1.9 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$  и  $K_{TAZ-CdSe} = 6.7 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ .

D.A. KOMISSAR<sup>1</sup>, A.S. SELYUKOV<sup>1,2</sup>, A.G. VITUKHNOVSKY<sup>1,2</sup>,  
R.B. VASILIEV<sup>3</sup>, N.S. KUROCHKIN<sup>1,2</sup>, V.R. SOLOVEY<sup>1</sup>

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

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

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

## FÖRSTER ENERGY TRANSFER IN ORGANIC LIGHT-EMITTING DIODE BASED ON CdSe PLANAR NANOCRYSTALS

The rates of excitation transfer from TAZ and TPD organic transport layers to active emitting layer of CdSe planar nanocrystals in organic light-emitting diode are investigated. It is demonstrated that the energy transfer from TPD donor molecules to a monolayer of CdSe nanocrystals is more efficient, given that the donors (TPD and TAZ) and acceptors (planar nanocrystals) are equally-separated with the characteristic transfer rates being  $K_{TPD-CdSe} = 1.9 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1}$  and  $K_{TAZ-CdSe} = 6.7 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1}$ .

Одним из наиболее динамично развивающихся направлений в области оптоэлектроники и нанофотоники является изготовление органических светоизлучающих диодов (OLED). Новым перспективным материалом для создания таких устройств являются планарные полупроводниковые нанокристаллы (нанопластины, NPLs) CdSe [1]. Эти нанокристаллы

обладают исключительно узкой полосой межзонной люминесценции (FWHM~10 нм) и малым временем релаксации электронного возбуждения (~10 нс) и имеют толщины порядка нескольких атомных слоев.

Целью данной работы являлось исследование особенностей переноса экситонного возбуждения от доноров (D, транспортные слои TPD и TAZ) к акцептору (A, активный излучающий слой из нанопластин CdSe) в гибридном NPL-OLED со структурой: ITO/PEDOT:PSS/TPD/NPLs/TAZ/AI, изготовленном в [1].

Выражение для скорости передачи энергии экситонного возбуждения от молекулы-донора монослою наночастиц имеет вид:  $K_{D-A} = l/\tau \cdot [l_F/l]^4$  [2], где  $\tau$  – время жизни возбужденного состояния доноров (для TAZ  $\tau = 1.5$  нс и для TPD  $\tau = 0.5$  нс),  $l$  – расстояние от донора до плоскости монослоя,  $l_F$  – характерное расстояние, на котором спонтанная релаксация доноров и резонансная передача энергии на акцепторы равновероятны. Для плотно упакованного слоя наночастиц  $l_F = R_F^{3/2} / h_{NPL}^{1/2}$ , где  $h_{NPL} = d_{NPL} + l_{OA}$  – эффективная толщина нанокристалла,  $d_{NPL} = 1.2$  нм – толщина наночастицы,  $l_{OA} = 2.5$  нм – длина лигандов, покрывающих наночастицу. Ферстеровский радиус  $R_F$ , характеризующий расстояние эффективной передачи энергии возбуждения от молекулы-донора одиночной наночастице [2]:  $R_F^6 = 3c / (32\pi^4) \cdot [F_D(\lambda)\sigma_A(\lambda)\lambda^2 d \lambda]$ , где  $c$  – скорость света,  $n$  – показатель преломления среды ( $n = 1.7$ ),  $\sigma_A(\lambda)$  – сечение поглощения света для акцептора,  $F_D(\lambda)$  – нормированный спектр фотолюминесценции донора.

Были получены зависимости характерной скорости  $K$  передачи экситонного возбуждения от молекул TPD и TAZ слою нанопластин CdSe для расстояний между донором и акцептором в пределах от  $l_{OA}$  до  $l_F$ . Для критического значения расстояния между донором и акцептором  $l=l_F$  эти скорости составили  $K_{TPD-CdSe} = 1.9 \cdot 10^9 \text{ c}^{-1}$  и  $K_{TAZ-CdSe} = 6.7 \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}$ .

Было показано, что при условии равноудаленности доноров от слоя нанопластин CdSe, передача энергии экситонного возбуждения от TPD этому слою является более эффективной. Данный результат обусловлен меньшим временем релаксации для TPD и большим перекрытием фотолюминесценции TPD и поглощения нанопластин.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 15-02-05856 А, 16-29-11805 офи\_м и 16-02-00594 А.

#### Список литературы

1. Selyukov A.S., Vitukhnovskii A.G., et. al. // JETP. 2015. V.120 (4). P.595-606.
2. Vashchenko A.A., Lebedev V.S., et. al. // JETP Letters. 2012. V.96 (2). P.113-117.

Д.А. КИСЛОВ

*Оренбургский государственный университет*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ЯЧЕЕК ГРЕТЦЕЛЯ С ПЛАЗМОННЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ СЕРЕБРА**

Приведены расчеты по аналитической модели на основе уравнения диффузии с рекомбинационным слагаемым, а также результаты имитационного моделирования исследуемых образцов методом FDTD. Показано, что одним из механизмов влияния плазмонных наночастиц серебра на параметры работы фотоячеек является плазмонное усиление поглощательной способности молекул красителя.

D.A. KISLOV

*Orenburg State University*

## **MODELING OF GRAETZEL SOLAR CELLS WITH PLASMONIC SILVER NANOPARTICLES**

Calculations for the analytical model based on the diffusion equation with recombination term, and the results of simulation using FDTD are presented. It is shown that one of the influence mechanisms of plasmonic silver nanoparticles on the parameters of Graetzel solar cell is plasmon enhancement of dye molecules absorption ability.

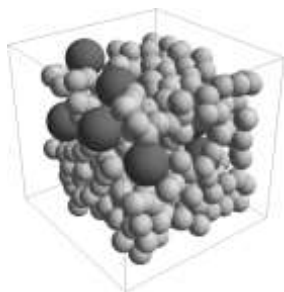


Рис. 1. 3D образец ячейки Гретцеля состоящий из наночастиц диоксида титана и серебра

Работы над улучшением характеристик ячейки Гретцеля постоянно ведутся. Одним из перспективных способов решения данной проблемы является использование в конструкции солнечной батареи специально сформированных кластеров из наночастиц обладающими плазмонными свойствами (рис. 1) [1, 2].

Используя математическую модель на основе уравнения диффузии с рекомбинационным слагаемым, произведено вычисление основных характеристик ячеек Гретцеля.

В результате исследования показано, что одним из механизмов влияния плазмонных наночастиц серебра на параметры работы фотоячеек



является плазмонное усиление поглощательной способности молекул красителя [3, 4]. Показано, что при увеличении коэффициента поглощения молекул в 10 раз, ток короткого замыкания увеличивается примерно в 1.6 раза (рис. 2), а КПД при этом возрастает на 50%. Сравнение расчетов с экспериментальными данными показывает хорошее качественное и количественное согласование.

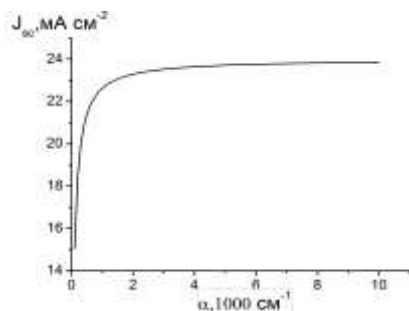


Рис. 2. Зависимость тока короткого замыкания от коэффициента поглощения молекул красителя с учетом влияния плазмонных наночастиц серебра - результат аналитического расчета

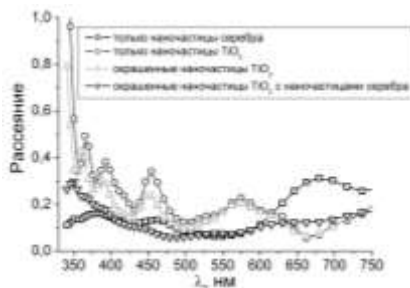


Рис. 3. Спектры поглощения исследуемых ячеек Гретцеля - результат моделирования методом FDTD

Кроме того, проведено компьютерное моделирование методом FDTD изучаемых солнечных ячеек Гретцеля с внедренными наночастицами серебра. При помощи Фурье преобразования временной зависимости напряженности электрического поля в определенных точках счетного объема, были рассчитаны спектры рассеяния и поглощения исследуемых образцов (рис. 3). В результате показано, что образцы с внедренными наночастицами серебра поглощают больше света, чем стандартные образцы ячеек Гретцеля

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-08-04132\_а и Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (стипендия Президента Российской Федерации, № СП-1340.2015.1).

#### Список литературы

1. Kislov D A // Physics Procedia. 2015. V.73. P.114.
2. Nahm C., et al. // Appl. Phys. Lett. 2011. V.99. 253107.
3. Kucherenko M.G., Nalbandyan V.M. // Russian Physics Journal. 2016. 59 (9). P.87.
4. Kucherenko M.G., Kislov D.A., Chmereva T.M. // Nanotechn. in Russia. 2012. 7(3-4). P.196.

С.А. ОНИЩУК, А.С. МУРАДОВА  
*Кубанский государственный университет, Краснодар*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИИ КРЕМНИЕВЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИХ ПРОТОНАМИ**

Освещается вопрос необходимости защиты солнечных элементов (СЭ) от последствий радиационного облучения в космосе. Рассмотрены причины снижения фоточувствительности СЭ, облучаемых протонами.

S.A. ONISCHUK, A.S. MURADOVA  
*Kuban State University, Krasnodar*

## **STUDY OF DEGRADATION OF SILICON SOLAR CELLS AT IRRADIATION BY PROTONS**

The article highlights the issue of the need to protect the solar cells from the effects of radiation exposure in space. The reasons for reducing the photosensitivity of solar cells irradiated by protons.

В космосе солнечные элементы (СЭ) являются безальтернативными источниками энергии, однако СЭ подвержены радиационному облучению, что приводит к деградации их характеристик. Наиболее часто используются СЭ на основе кремния, но при облучении кремниевых СЭ уменьшаются фототок, фото-ЭДС и связанная с ним выходная мощность элемента [1]. При этом фототок короткого замыкания уменьшается сильнее напряжения холостого хода  $U_{xx}$ , спектральная чувствительность снижается в области максимума спектральной характеристики и в длинноволновой части спектра [2].

Наблюдаемая в эксперименте деградация фотоэлектрических параметров кремниевых СЭ при их облучении объясняется сокращением времени жизни неосновных носителей в базе и уменьшением коэффициента собирания носителей заряда. Известно, что длинноволновая часть спектральной чувствительности СЭ обусловлена генерацией неравновесных носителей заряда в базе, и введение дефектов в область базы уменьшает величину чувствительности [3].

В настоящей работе исследовались кремниевые СЭ, облучаемые моноэнергетическими протонами с энергией  $E=20,0$  МэВ на установке У-240 флюенсами  $3 \cdot 10^{10}$ ,  $3 \cdot 10^{11}$ ,  $3 \cdot 10^{12}$ ,  $3 \cdot 10^{13}$  пр/см<sup>2</sup>. У СЭ произошла

деградация их характеристик: фототока, фото-ЭДС, выходной мощности элемента, фототока короткого замыкания, напряжения холостого хода  $U_{xx}$ . Полученный результат объясняется тем, что протоны таких энергий проникают на значительную глубину в СЭ, где и создают дефекты, распределенные по толщине прибора. Так как толщина эмиттера (около 0.5 мкм) почти на три порядка меньше толщины базовой области СЭ (350-400 мкм), то на долю эмиттера приходится значительно меньшее количество радиационных дефектов, чем на базу СЭ, что соответствующим образом сказывается на изменении диффузионных длин эмиттера и базовой области СЭ.

Была проведена математическая аппроксимация спектральной чувствительности СЭ методом подбора функции для изогнутой составляющей спектральной чувствительности и произведен расчет параметров для прямой и кривой частей характеристики. Для аппроксимации кривой части характеристики использовалась упрощенная S-функция, которую можно представить в виде произведения степенной функции на экспоненту [4], при этом значение показателя стабилизации  $S_{st} = 0$ , а параметр, определяющий разницу между значениями показателя стабилизации,  $u = 1$ . Подбиралось лишь 4 параметра: значение первого экстремума функции -  $a$ , значение второго экстремума функции -  $b$ , прирост или спад значения показателя -  $H$  и параметр, определяющий форму функции (островершинность или пологость) -  $c$ . Была установлена зависимость положения максимума спектральной чувствительности, и величина максимума от логарифма флюенса.

В результате проделанной работы установлена динамика параметров функции, описывающей спектральную чувствительность СЭ при облучении протонами. Это позволяет с высокой точностью предсказать данную характеристику для любого флюенса протонов в пределах исследованного диапазона.

#### *Список литературы*

1. Бакиров М.Я., Беркелиев А. и др. Радиационные эффекты в солнечных элементах. // Гелиотехника. 1990. №6. С.47-49.
2. Онищук С.А., Климова Г.И., Шкаранда В.А. Облучение радиационноустойких солнечных элементов потоком протонов. // Материалы Межд. дистанционной научн.-практ. конф. «Процессы и явления в конденсированных средах». Краснодар: КубГУ, 2005. С.45-57.
3. Онищук С.А. Механизмы радиационного дефектообразования в кремнии. // Сборник научн. тр. научн.-практ. лонф. «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании - 2007». Одесса: Черноморье, 2007. Т.5. С.79-82.
4. Онищук С.А. Взаимосвязь параметров в частном случае S-функции. // Материалы XII Южно-российской научно-практической конференции «Инновационные технологии в образовательном процессе» Т.1. Краснодар: КВВАУЛ, 2010. С.305-308.

В.И. ИВАНОВ, Г.Д. ИВАНОВА

*Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск***СВЕТОИНДУЦИРОВАННАЯ ТЕРМОДИФФУЗИЯ  
НАНОЧАСТИЦ**

Проанализирована термодиффузия поглощающего компонента в тонком слое жидкости в поле гауссова пучка излучения. Определено влияние светоиндуцированной термодиффузии на распределение температуры в слое среды.

V.I. IVANOV, G.D. IVANOVA

*Far Eastern State Transport University, Khabarovsk***LIGHT INDUCED THERMODIFFUSION OF NANOPARTICLES**

A thermodiffusion of the absorbing component in a thin layer of liquid was analyzed in the field of Gaussian beam radiation. The influence of light induced thermal diffusion was founded on temperature distribution in a layer of liquid.

Светоиндуцированная термодиффузия в двухкомпонентной жидкости обусловлена перераспределением концентрации компонент в неоднородном световом поле и соответствующем изменении оптических свойств среды. В случае различающихся коэффициентов поглощения компонент изменение их концентрации приводит также к изменению коэффициента поглощения среды (просветлению или потемнению), т. е. к нелинейному поглощению среды [1-3].

Рассмотрим двухкомпонентную жидкофазную среду, коэффициент поглощения которой  $\alpha$  целиком определяется одним компонентом с концентрацией  $C$  ( $\alpha = \beta C$ , где  $\beta = (\partial\alpha/\partial C)$  - константа среды). Пусть среда находится в тонкой цилиндрической кювете толщиной  $(d + 2L) \ll \omega$ . Для гауссова пучка распределение интенсивности падающего излучения в плоскости слоя  $I = I_0 \exp(-r^2 / \omega^2)$ , где  $\omega$  - радиус пучка,  $r$  - расстояние от оси пучка.

Систему балансных уравнений для концентрации  $C$  и теплового потока запишем для обычным образом [1-3]:

$$c_p \rho \partial T / \partial t = -\operatorname{div} J_1 + \alpha I_0 \exp(-r^2 / \omega^2), \quad (1)$$

$$\mathcal{C} / \partial t = -\operatorname{div} J_2, \quad (2)$$

где  $c_p, \rho$  - удельные теплоемкость и плотность среды,  $T$  - температура среды.

В стационарном режиме, считая, что для малых толщин слоя среды  $d$  и окна кюветы  $L$  ( $d, L \ll \omega$ ) можно пренебречь радиальным (вдоль  $r$ ) тепловым потоком, получаем из (1) одномерную тепловую задачу, решение которой:

$$T(0, r) = T_0 + \alpha d I_0 (L \chi_0^{-1} + \gamma^{-1} + d \chi_c^{-1} / 2) \exp(-r^2 / \omega^2), \quad (3)$$

где  $\gamma, T_0$  - соответственно коэффициент конвективного теплообмена и температура внешней среды,  $T_c = T(L + d / 2)$ ;  $\chi_0, \chi_c$  - коэффициенты теплопроводности материала окон кюветы и двухкомпонентной среды соответственно. Для толщин слоя  $d \ll L$  можем пренебречь изменением температуры в слое среды по толщине кюветы и принять ее равной  $T(0)$ . В установившемся режиме ( $(\partial T / \partial t) = (\partial C / \partial t) = 0$ ) из (3,5) имеем для стационарного распределения концентрации  $C_s$ :

$$C_s = C_0 \{1 + \omega^2 R^{-2} \ln[1 + F I_0 \exp(-R^2 / \omega^2)]\}^{-1} (1 + F I_0 \exp(-r^2 / \omega^2))^{-1}, \quad (4)$$

где  $F = \beta d (L \chi_0^{-1} + \gamma^{-1} + d \chi_c^{-1} / 2) D_{21} D_{22}^{-1}$ ,  $C_0$  - начальная концентрация частиц,  $R$  - внутренний радиус цилиндрической кюветы.

Полученные выражения позволяют определить кинетические коэффициенты среды из экспериментальных данных о параметрах наведенного излучением просветления (или поглощения – в зависимости от знака коэффициента термодиффузии) [4-6].

#### Список литературы

1. Иванов В.И., Иванова Г.Д., Хе В.К. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов, межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М. Самсонова, Н.Ю. Слобнякова. Тверь: Твер. гос. ун-т, 2013. Вып.5. С.112-115.
2. Иванов В.И., Иванова Г.Д., Хе В.К. // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2011. № 4. С.039-042.
3. Иванов В.И., Кузин А.А., Ливашвили А.И. // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика. 2010. Т.5. №1. С.5-8.
4. Окишев К.Н., Иванов В.И., Климентьев С.В., Кузин А.А., Ливашвили А.И. // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т.23. №2. С.106-107.
5. Крылов В.И., Иванова Г.Д., Хе В.К. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов, межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М. Самсонова, Н.Ю. Слобнякова. Тверь: Твер. гос. ун-т, 2013. Вып.5. С.329-334.
6. Иванов В.И., Ливашвили А.И., Окишев К.Н. // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2008. Т.51. №3. С.50-53.

А.В. КОЛЧИН, Д.Ю. ПУГАЧЕВ, Н.Б. ТКАЧЕНКО,  
А.И. ЕФИМОВА, С.В. ЗАБОТНОВ, Л.А. ГОЛОВАНЬ  
*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

## **ЭФФЕКТИВНОЕ ДИФFUЗНОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА МАССИВАМИ КРЕМНИЕВЫХ НАНОНИТЕЙ**

Показано влияние толщины массивов кремниевых нанонитей на эффективность процессов упругого и неупругого рассеяния света в таких структурах. При толщинах, превышающих длину волны накачки, значения коэффициента диффузного отражения и сигнала комбинационного рассеяния света многократно превосходят аналогичные величины для массивов нанонитей меньшей толщины за счет диффузного характера распространения света.

A.V. KOLCHIN, D.Yu. PUGACHEV, N.B. TKACHENKO,  
A.I. EFIMOVA, S.V. ZABOTNOV, L.A. GOLOVAN  
*Lomonosov Moscow State University*

## **EFFECTIVE DIFFUSE LIGHT SCATTERING BY SILICON NANOWIRE MASSIVES**

The influence of the thickness of silicon nanowires arrays on the efficiency of elastic and inelastic scattering in these structures was shown. At thicknesses greater than the pumping wavelength values of diffuse reflectance and Raman shift are many times higher than those values for nanowires arrays with smaller thickness due to diffuse nature of light propagation.

Поиски наноматериалов с улучшенными оптическими свойствами для применения в фотонике активно ведутся с использованием современных методов микро- и наноструктурирования конденсированных сред. В частности, широкие перспективы в этом направлении открывают массивы кремниевых нанонитей (КНН) [1].

Изучаемые в данной работе образцы толщиной от 0,2 до 15 мкм были сформированы методом металл-стимулированного химического травления кристаллического кремния (с-Si) [2]. Упругое и неупругое рассеяние света массивами КНН изучалось методами спектродетекции, кросс-корреляционных функций и комбинационного рассеяния света (КРС) соответственно.

Было обнаружено, что в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне наблюдается рост диффузной компоненты отражения света до 49%, в то

время как зеркальная монотонно уменьшается практически до нуля. Для массивов КНН толщиной меньше 0,5 мкм зависимости коэффициента диффузного отражения света обладают почти нулевой крутизной. Это объясняется тем, что в этом случае существенный вклад в отражение оказывает кремниевая подложка, обладающая только зеркальной компонентой отражения, а толщина массивов КНН не превышает длины волны. Начиная с толщины 5 мкм наблюдается незначительный спад диффузного отражения для длин волн 417 и 632 нм, вероятнее всего, из-за доминирования поглощения над светорассеянием. Напротив, зависимости для длин волн 1064, 1125 и 1250 нм демонстрируют монотонный рост с увеличением толщины массивов КНН из-за значительного вклада рассеяния в отраженный сигнал в условиях слабого поглощения кремнием излучения в ближнем ИК диапазоне. Такой характер рассеяния свидетельствует о возможном проявлении эффекта слабой локализации света в этих структурах [3]. Эта гипотеза подтверждается увеличением в 4 раза длительности кросс-корреляционной функции фемтосекундных лазерных импульсов, прошедших через исследуемые образцы, по сравнению с зеркально отраженным сигналом.

Наблюдаемые тенденции соответствуют диффузному характеру распространения света в мезоскопической среде и проявляются также в процессах неупругого рассеяния. Так при длине волны возбуждения 1064 нм стока компонента линии  $520 \text{ см}^{-1}$  кремния увеличивается до 4 раз и становится деполяризованной в массивах КНН толщиной более 5 мкм по сравнению с-Si. Так же спектры КРС для таких структур имеют широкую область фотолюминесценции в диапазоне  $100\text{-}900 \text{ см}^{-1}$  с максимумом  $700 \text{ см}^{-1}$ , вызванную квантово-размерным эффектом вследствие наличия пор и шероховатостей размером меньше 5 нм, а зависимость усиления стоковой компоненты выходит на насыщение в силу вклада поглощения и экстинкции по закону Бугерта-Ламберта-Бера в ближнем ИК диапазоне.

Полученные результаты позволяют рассматривать массивы КНН как среду для детектирования внедренных в них инородных веществ по линиям КРС.

Работа поддержана грантом РФФИ №15-29-01185.

*Список литературы*

1. Yang P., et al. // Nano Lett. 2010. V.10. P.1529-1536.
2. Sivakov V.A., et al. // J. Phys. Chem. C. 2010. V.114. P.3798-3803.
3. Lagendijk A. Current trends in optics, Ch. 4 «Can light be localised?», London: Academic, 1994.

М.Г. КУЧЕРЕНКО, Д.А. КИСЛОВ  
*Оренбургский государственный университет*

**ПЛАЗМОН-АКТИВИЗИРОВАННЫЙ  
МЕЖМОЛЕКУЛЯРНЫЙ БЕЗЫЗЛУЧАТЕЛЬНЫЙ ПЕРЕНОС  
ЭНЕРГИИ В СФЕРИЧЕСКИХ НАНОРЕАКТОРАХ**

Представлены экспериментальные и теоретические результаты, подтверждающие эффект влияния металлических наночастиц на межмолекулярный безызлучательный перенос энергии в кластерных структурах, образующихся в нанополостях пористой среды и в мицеллярных растворах.

M.G. KUCHERENKO, D.A. KISLOV  
*Orenburg State University*

**PLASMON-ACTIVATED INTERMOLECULAR  
RADIATIONLESS ENERGY TRANSFER  
IN SPHERICAL NANOREACTORS**

Experimental and theoretical results confirming the effect of metal nanoparticles on intermolecular radiationless energy transfer in cluster structures formed in nanocavity porous media and in micellar solutions are presented.

Для наблюдения максимального эффекта влияния плазмонных наноструктур на межмолекулярный безызлучательный перенос энергии необходима пространственная локализация всех реагентов в единый кластер. Объединение трех компонентов «донор-акцептор-металлическая наночастица» осуществляется естественным образом при использовании в качестве среды твердые нанопористые структуры [1] либо водные пулы обратных мицелл (ОМ) [2].

В данной работе рассмотрен перенос энергии в каждом из таких нанореакторов для двух донор-акцепторных пар молекул: акридиновый оранжевый (АО) – бенгальский розовый (БР) (случай локализации в обратной мицелле); акридиновый оранжевый – нильский синий (НС) (случай локализации в полости пористого силохрома С-80). В качестве плазмонной подсистемы в обоих случаях использовались сферические наночастицы серебра.

Экспериментально показано, что при такой пространственной локализации наночастицы металла выступают в роли плазмонного рефлектора электромагнитного поля и увеличивают эффективность



переноса энергии, как в обратных мицеллах ПАВ, так и в полостях пористого слохорома С-80 (рис. 1 и 2).

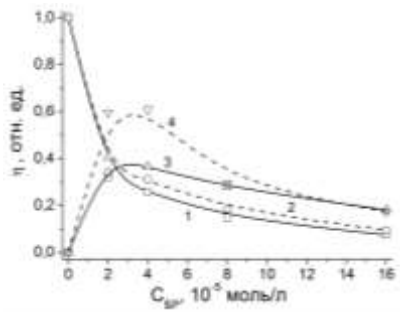


Рис. 1. Экспериментальные концентрационные зависимости квантовых выходов люминесценции отдельных компонент донор-акцепторной системы АО-БР в растворе ОМ с наночастицами и без них (1 – АО без наночастиц; 2 – АО с наночастицами; 3 – БР без наночастиц; 4 – БР с наночастицами)

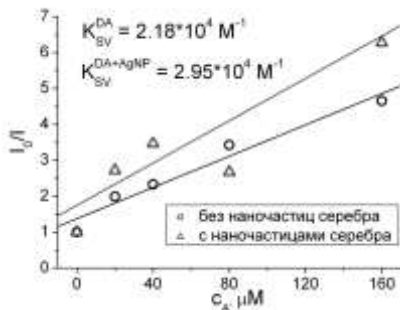


Рис. 2. Экспериментальные константы тушения Штерна-Фольмера для донорно-акцепторной пары молекул АО-НС в нанопорах слохорома С-80

Наряду с экспериментом приводятся результаты расчетов по теоретической модели, которая, например, в случае твердой пористой среды учитывает эффект поляризации стенок нанореактора при расчете характеристик локального поля в полости [1]. Кроме того, представлены результаты имитационного моделирования методом конечных разностей во временной области (FDTD). Получено хорошее качественное согласие результатов эксперимента, аналитических расчётов и компьютерного моделирования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-08-04132\_a и Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (стипендия Президента Российской Федерации, № СП-1340.2015.1).

#### Список литературы

1. Кучеренко М.Г., Кислов Д.А. // Труды IX международной конф. «ФПО - 2016». С.89.
2. Измоденова С.В., Кислов Д.А., Кучеренко М.Г. // Коллоид журн. 2014. 76 (6). С.734.

Е.И. КОНСТАНТИНОВА<sup>1,2</sup>, К.И. МАТВЕЕВА<sup>1</sup>, В.В. БРЮХАНОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград*

<sup>2</sup>*Калининградский государственный технический университет*

## **ЭКСИТОН-ПЛАЗМОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК ТИПА CdZnSZnS И CdZnSeS С НАНОЧАСТИЦАМИ СЕРЕБРА В ПЛЕНКЕ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА**

Проведено спектрально-кинетическое исследование безызлучательных процессов переноса электронной энергии между наночастицами (НЧ) серебра ( $R=30$  нм), полученных методом фемтосекундной лазерной абляции в жидкость, и квантовыми точками (КТ) CdZnSZnS и CdZnSeS в пленке полиметилметакрилата (ПММА). Было обнаружено, что в присутствии НЧ серебра происходит усиление люминесценции квантовых точек CdZnSZnS и тушение – квантовых точек CdZnSeS.

E.I. KONSTANTINOVA<sup>1,2</sup>, K.I. MATVEEVA<sup>1</sup>, V.V. BRYUKHANOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Immanuel Kant Baltic Federal State University, Kaliningrad*

<sup>2</sup>*Kaliningrad State Technical University*

## **EXCITON-PLASMON INTERACTION CdZnSZnS AND CdZnSeS QUANTUM DOTS WITH SILVER NANOPARTICLES IN POLYMETHYLMETHACRYLATE FILM**

Spectral-kinetic investigation of nonradiative electron energy transfer between silver nanoparticles (NPs) ( $R=30$  nm) synthesized by femtosecond laser ablation method in liquid and CdZnSZnS and CdZnSeS quantum dots (QDs) in polymethylmethacrylate film (PMMA) was carried out. It was found that in the present of silver NPs luminescence of CdZnSZnS QDs are increases, but luminescence of CdZnSeS QDs was quenching.

Полупроводниковые КТ благодаря оптическим свойствам, определяемыми квантово-размерными эффектами, являются перспективным материалом для приложений в различных областях нанотехнологии и медицины [1, 2]. Поскольку многие из этих приложений требуют источников синего и зеленого излучения, то для создания высокоэффективных светодиодов [2] перспективны коллоидные квантовые точки. Поверхностный плазмонный резонанс [3], генерируемый в металлических НЧ под оптическим излучением, за счет передачи

электронной энергии на КТ, может существенно увеличить их эффективность [4, 5].

В данной работе проведено спектрально-кинетическое исследование влияния плазмонного резонанса абляционных НЧ серебра ( $R=30$  нм) на фотолюминесценцию КТ типа  $CdZnSeSZnS$  ( $\lambda_{\text{люм}}=400$  нм, «синие») и  $CdZnSeS$  ( $\lambda_{\text{люм}}=550$  нм, «зеленые») в пленке ПММА ( $\delta \cong 30$  мкм). Концентрации КТ в пленке была постоянной и составила  $C = 2,8 \cdot 10^{-4}$  М (для «синих» КТ) и  $C = 1,3 \cdot 10^{-5}$  М (для «зеленых» КТ), концентрация НЧ серебра варьировалась:  $C_1=5 \cdot 10^{-9}$  М,  $C_2=2,5 \cdot 10^{-9}$  М и  $C_3=2,5 \cdot 10^{-10}$  М.

В спектрах люминесценции КТ при возбуждении  $\lambda=350$  нм было обнаружено увеличение интенсивности «синих» КТ на 40%, и уменьшение интенсивности «зеленых» на 12%. Изменение интенсивности люминесценции КТ может быть обусловлено как эффектом поверхностного плазмонного резонанса НЧ серебра, так и процессом перепоглощения КТ [5].

Результаты получены в рамках государственного задания Минобрнауки России № 3.809.2014/К.

*Список литературы*

1. Витухновский А.Г., Вашенко А.А. и др. // Физика и техника полупроводников. 2013. №7. С.962.
2. Li B., Zhang X., et. al. // Journal of Solid State Chemistry. 2014. 214.
3. De Luca A., Depalo N. // Nanoscale. 2013. V.5(13). P. 6097-6105.
4. Климов В.В. Наноплазмоника. М.: Физматлит, 2009.
5. Ragab A.E., Gadallah A.-S., et. al. // Optics Communications. 2014. V.314. P.86-89.

Г.Д. ИВАНОВА, С.И. КИРЮШИНА, А.В. МЯГОТИН  
*Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск*

## **ДИНАМИЧЕСКИЕ ГОЛОГРАММЫ В НАНОСУСПЕНЗИИ**

Проведен теоретический анализ эффективности записи динамических голограмм в дисперсной жидкофазной среде с электрострикционной нелинейностью. Показано, что при большой интенсивности излучения амплитуды первых гармоник нелинейно зависят от величины последней.

G.D. IVANOVA, S.I. KIRJUSHINA, A.V. MJAGOTIN  
*Far Eastern State Transport University, Khabarovsk*

## **DYNAMIC HOLOGRAMS EFFICIENCY IN A NANOSUSPENSION**

The theoretical analysis of the dynamic holograms efficiency in the dispersion liquid medium with electrostrictive nonlinearity is carried out. The amplitudes of the first harmonics depends from the intensity of the light at a nonlinear regime it is shown.

В микрогетерогенной среде с различными показателями преломления компонентов на микрочастицы в электромагнитном поле действуют термодиффузионные и электрострикционные силы, которые могут быть причиной возникновения концентрационных потоков. Такие механизмы могут быть использованы для записи динамических голограмм в дисперсных средах [1-3].

Целью данной работы является теоретический анализ эффективности записи динамических голограмм в среде с электрострикционной нелинейностью при больших интенсивностях излучения, когда, в отличие от работ [3-5], изменение концентрации не обязательно мало.

В качестве дисперсной системы мы будем рассматривать прозрачную жидкофазную среду с наночастицами (наносуспенсию), находящуюся под воздействием лазерного облучения. Балансное уравнение, описывающее динамику концентрации наночастиц в жидкофазной среде с учётом диффузионного и электрострикционного потоков, решается только в стационарном режиме [6]:

$$D\nabla C + \gamma C \nabla I = 0. \quad (1)$$

Здесь приняты следующие обозначения:  $C(x, t)$  - массовая концентрация дисперсных частиц,  $D$  - коэффициент диффузии,

$\gamma = \frac{4\pi\beta D}{cnk_B T}$ ,  $\beta$  - поляризуемость частиц,  $k_B$  - постоянная Больцмана,  $n$  - эффективный показатель преломления среды,  $\bar{c}$  - скорость света в вакууме.

Общее решение уравнения (1) ищем в виде  $C = Be^{\alpha \cos Kx}$ , где  $K$  - волновой вектор интерференционной решетки,  $x$  - координата в плоскости слоя среды. Безразмерный параметр  $\alpha = I/I_s$  показывает превышение интенсивности над интенсивностью насыщения, когда  $C_S(x, t) \approx C_0$ . Для больших изменений концентрации частиц имеем  $\alpha \gg 1$ . Константу  $B$  находим из условия нормировки (сохранения числа частиц).

Окончательно получаем выражение для зависимости концентрации частиц от приведенной координаты ( $y = Kx$ )

$$C(y) = \pi \div \int_0^{\pi} \alpha^{\cos y} dy \times e^{\alpha \cos y}. \quad (2)$$

Поскольку амплитуда модуляции почти экспоненциально растет с увеличением интенсивности, то можно ожидать значительного увеличения эффективности записи голограмм при больших интенсивностях. Полученные результаты актуальны для динамической голографии дисперсных жидкофазных сред, а также для оптической диагностики таких сред [7-9].

#### Список литературы

1. Иванов В.И. Термоиндуцированные механизмы записи динамических голограмм: монография. Владивосток: Дальнаука, 2006.
2. Иванов В.И., Ливашвили А.И. и др. // Оптический журнал. 2004. №9. С.236.
3. Иванов В.И., Окишев К.Н. // Письма в Журнал технической физики. 2006. Т.32. №22. С.22-25.
4. Иванова Г.Д., Кирюшина С.И., Мяготин А.В. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов: межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. Тверь: Твер. гос. ун-т, 2014. Вып.6. С.122-125.
5. Ivanov V.I., Simakov S.R. // Russian Physics Journal. 2001. V.44. №1. P.117-118.
6. Иванов В.И., Иванова Г.Д., Кирюшина С.И., Мяготин А.В. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2015. Т.58. № 11-3. С.153-156.
7. Иванов В.И., Ливашвили А.И., Окишев К.Н. // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика. 2009. Т.4. №2. С.58-60.
8. Иванов В.И., Карпец Ю.М. // Вестник ДВО РАН. 2003. №1. С.93-97.
9. Ivanov V.I., Ivanova G.D., Kirjushina S.I., Mjagotin A.V. // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V.735. P. 012013.

М.Г. КУЧЕРЕНКО, В.М. НАЛБАНДЯН  
*Оренбургский государственный университет*

## СТРУКТУРА БЛИЖНЕГО ПОЛЯ СЛОИСТОГО НАНОЦИЛИНДРА С ЗАМАГНИЧЕННОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЖИЛОЙ И ЭКСИТОНОГЕННОЙ ОБОЛОЧКОЙ

Рассчитана дипольная поляризуемость единицы длины слоистого цилиндра, состоящего из металлической сердцевины, покрытой слоем агрегированных молекул, в котором возникают экситоны, а также напряженность электрического поля вблизи него. Учтено влияние внешнего магнитного поля на характеристики поляризуемости проводящей части композита. Показано, что в результате происходит изменение конфигурации электрического поля вблизи цилиндра.

M.G. KUCHERENKO, V.M. NALBANDYAN  
*Orenburg State University*

## THE STRUCTURE OF THE NEAR-FIELD LAYERED NANOCYLINDER WITH A MAGNETIZED METAL CORD AND EXCITONOGENEOUS SHELL

Dipole polarizability per unit length of the layered cylinder consisting of the metal core coated with a layer of the aggregated molecules in which occur the excitons, and also electric field strength near him is calculated. Influence of external magnetic field on polarizability characteristics of the conductive composite parts is considered. The change of a configuration of electric field near the cylinder is shown as a result.

Известно, что в магнитном поле поляризуемость становится тензорной величиной [1]. Поляризуемость цилиндрического слоистого нанокompозита представляет собой следующий тензор второго ранга:

$$\begin{aligned} \vec{\alpha}(\vec{\varepsilon}_{pl}(\omega|\mathbf{B}), \varepsilon_{ex}(\omega), \varepsilon_3) = \\ = \left[ \left( \vec{\varepsilon}_{pl}(\omega|\mathbf{B}) + \varepsilon_{ex}(\omega) \right) \left( \varepsilon_{ex}(\omega) - \varepsilon_3 \right) + \left( \vec{\varepsilon}_{pl}(\omega|\mathbf{B}) - \varepsilon_{ex}(\omega) \right) \left( \varepsilon_{ex}(\omega) + \varepsilon_3 \right) \xi^2 \right] \times \\ \times \left[ \left( \vec{\varepsilon}_{pl}(\omega|\mathbf{B}) + \varepsilon_{ex}(\omega) \right) \left( \varepsilon_{ex}(\omega) + \varepsilon_3 \right) + \left( \vec{\varepsilon}_{pl}(\omega|\mathbf{B}) - \varepsilon_{ex}(\omega) \right) \left( \varepsilon_{ex}(\omega) - \varepsilon_3 \right) \xi^2 \right]^{-1} R^2, \end{aligned}$$

где  $\mathbf{B}$  - вектор индукции магнитного поля,  $\vec{\varepsilon}_{pl}(\omega|\mathbf{B})$  - тензор диэлектрической проницаемости проводящей части, зависящий от

плазменной частоты металла,  $\varepsilon_{ex}(\omega) = \varepsilon_0 - f^2 / [(\omega + i\Gamma)^2 - \omega_{res}^2]$  - диэлектрическая проницаемость внешнего экситонного слоя,  $f$  - сила осциллятора, характеризующая связь фотонов с экситонами;  $\Gamma$  - ширина спектральной полосы;  $\omega_{res}^2$  - частота экситонов.

Напряженность  $\mathbf{E}(r, \theta)$  поля вблизи слоистого цилиндрического композита с замагниченным металлическим кордом определяется выражением

$$\mathbf{E}(r, \theta) = \mathbf{E}_0 - \bar{\nabla} \bar{\alpha}(\bar{\varepsilon}_{pl}(\omega | \mathbf{B}), \varepsilon_{ex}(\omega), \varepsilon_3) \mathbf{E}_0 \mathbf{r} / r^2,$$

$\mathbf{E}_0$  - вектор напряженности иницирующего электрического поля.

Расчеты проведены для удельной дипольной динамической поляризуемости цилиндра при различных значениях индукции магнитного поля. Выявлено, что при определенных значениях параметров системы ( $R = 50 \text{ нм}$ ,  $\rho = 30 \text{ нм}$ ,  $\omega_{pl} = 1.38 \times 10^{16} \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega_{ex} = 4.6 \times 10^{15} \text{ с}^{-1}$ ), в высокочастотной области спектра формируется плазменный пик, а в низкочастотной - два экситонных. Плазменная полоса, в отличие от экситонной, чувствительна к воздействию магнитного поля.

Обнаружено, что под воздействием внешнего магнитного поля, изменяется конфигурация векторного конфигурационного поля (рис. 1).

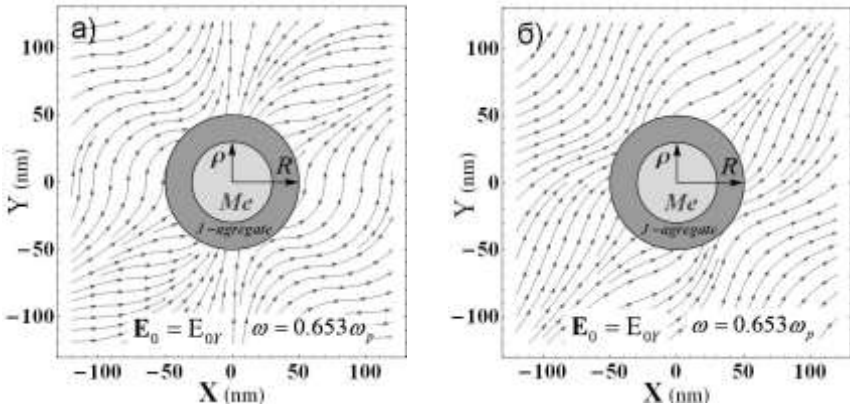


Рис. 1. Сравнение векторных полей вблизи слоистого наноцилиндра при разных индукциях магнитного поля: а)  $B = 0 \text{ Тл}$ , б)  $B = 20 \text{ Тл}$ ;  $\mathbf{B} \parallel Z$

Список литературы

1. Кучеренко М.Г., Налбандян В.М. // Вестник ОГУ. 2014. №1 (162). С.118-126.

А.В. ЕГОРЫШЕВА<sup>1</sup>, Т.Д. ДУДКИНА, О.М. ГАЙТКО<sup>1</sup>,  
П.О. РУДНЕВ<sup>1,2</sup>

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
<sup>1</sup>Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва  
<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

## СПЕКТРЫ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $\text{Bi}_{1,8}\text{Fe}_{1,2(1-x)}\text{Ga}_{1,2x}\text{SbO}_7$ СО СТРУКТУРОЙ ПИРОХЛОРА

Изучение колебательных спектров твердых растворов  $\text{Bi}_{1,8}\text{Fe}_{1,2(1-x)}\text{Ga}_{1,2x}\text{SbO}_7$  со структурой пирохлора показало, что соединения имеют сильно разупорядоченную структуру. Установлено, что положение края поглощения  $\text{Bi}_{1,8}\text{Fe}_{1,2(1-x)}\text{Ga}_{1,2x}\text{SbO}_7$  определяется переходом с переносом заряда  $[\text{FeO}_6]$  октаэдров, вследствие чего наиболее широкозонным соединением является  $\text{Bi}_{1,8}\text{Ga}_{1,2}\text{SbO}_7$  (2.90 эВ), а наиболее узкозонным -  $\text{Bi}_{1,8}\text{Fe}_{1,2}\text{SbO}_7$  (1.88 эВ).

A.V. EGORYSHEVA<sup>1</sup>, T.D. DUDKINA, O.M. GAJTKO<sup>1</sup>,  
P.O. RUDNEV<sup>1,2</sup>

*National research nuclear university MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)  
<sup>1</sup>Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry, Moscow  
<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University*

## VIBRATIONAL SPECTRA OF $\text{Bi}_{1,8}\text{Fe}_{1,2(1-x)}\text{Ga}_{1,2x}\text{SbO}_7$ SOLID SOLUTIONS WITH PYROCHLORE STRUCTURE

The study of vibrational spectra of  $\text{Bi}_{1,8}\text{Fe}_{1,2(1-x)}\text{Ga}_{1,2x}\text{SbO}_7$  solid solutions with pyrochlore structure showed that the compounds have a highly disordered structure. It is found that the position of  $\text{Bi}_{1,8}\text{Fe}_{1,2(1-x)}\text{Ga}_{1,2x}\text{SbO}_7$  absorption edge resulting from the charge transfer transition of  $[\text{FeO}_6]$  octahedrals for which reason the most wide-band gap compound is  $\text{Bi}_{1,8}\text{Ga}_{1,2}\text{SbO}_7$  (2.90 eV) and the narrow-band gap -  $\text{Bi}_{1,8}\text{Fe}_{1,2}\text{SbO}_7$  (1.88 eV).

Интерес к Bi-содержащим соединениям со структурой типа пирохлора определяется широким спектром проявляемых ими функциональных свойств. Ранее [1] нами было показано, что  $\text{Bi}_{1,8}\text{Fe}_{1,2(1-x)}\text{Ga}_{1,2x}\text{SbO}_7$  относится к семейству магнитно фрустрированных сложных оксидов висмута, в которых осуществляются антиферромагнитные взаимодействия ближнего порядка, а при низких температурах обнаружен переход в состояние спинового стекла. Спектроскопия комбинационного рассеяния (КР) является чувствительным методом для определения



структурного разупорядочения, являющимся обязательным условием для формирования необычных спиновых состояний. Поэтому в настоящей работе в продолжение ранее начатого исследования мы приводим результаты изучения колебательных и оптических спектров твердых растворов  $\text{Bi}_{1.8}\text{Fe}_{1.2(1-x)}\text{Ga}_{1.2x}\text{SbO}_7$  со структурой пирохлора.

Согласно теоретико-групповому анализу распределение по неприводимым представлениям колебательных мод для структуры пирохлора имеет вид:  $\Gamma_{\text{opt}} = A_{1g}(\text{R}) + E_g(\text{R}) + 4F_{2g}(\text{R}) + 7F_{1u}(\text{IR}) + (4F_{2u} + 2F_{1g} + 3A_{2u} + 3E_u)$ , т.е. из 25 оптических мод, только 6 активны в КР-спектрах ( $A_{1g}$ ,  $E_g$ ,  $4F_{2g}$ ) и 7 ( $F_{1u}$ ) в ИК-спектрах. Эксперимент показал, что КР-спектр  $\text{Bi}_{1.8}\text{Fe}_{1.2(1-x)}\text{Ga}_{1.2x}\text{SbO}_7$  состоит из широких составных полос, разложение которых на Лоренцевы составляющие позволило выделить 10 индивидуальных линий. Проведено отнесение наблюдаемых полос и показано, что полосы ниже  $200 \text{ см}^{-1}$  следует относить за счет неактивных

в КР-, но активных в ИК-спектрах  $F_{1u}$  мод, обусловленных  $\text{O}'\text{-Bi-O}'$ ,  $\text{O-Bi-O}$  и  $\text{Bi-VO}_6$  колебаниями. Возникновение полос и уширение всех линий в КР-спектре обусловлено разупорядочением кристаллической решетки этих соединений.

Исследование спектров диффузного отражения позволило установить, что положение края поглощения  $\text{Bi}_{1.8}\text{Fe}_{1.2(1-x)}\text{Ga}_{1.2x}\text{SbO}_7$  определяется двумя близкими по энергиям переходами с переносом заряда  $[\text{BiO}_8]$  и  $[\text{FeO}_6]$  полиэдров. Причем переход  $[\text{FeO}_6]$  полиэдров имеет меньшую энергию, вследствие чего наиболее широкозонным является соединением, не содержащее атомы железа  $\text{Bi}_{1.8}\text{Ga}_{1.2}\text{SbO}_7$  (2.90 эВ), а наиболее узкозонным -  $\text{Bi}_{1.8}\text{Fe}_{1.2}\text{SbO}_7$  (1.88 эВ).

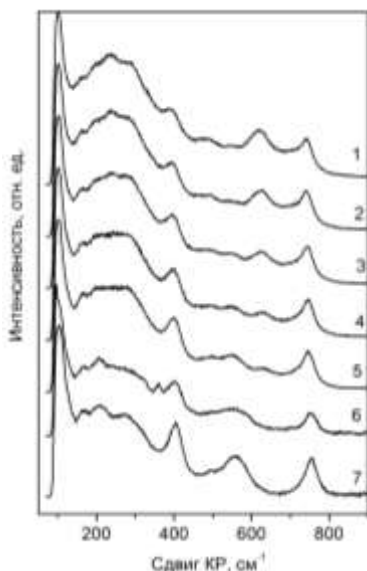


Рис. 1. КР-спектры твердых растворов  $\text{Bi}_{1.8}\text{Fe}_{1.2(1-x)}\text{Ga}_{1.2x}\text{SbO}_7$  для  $x = 0$  (1), 0.1 (2), 0.3 (3), 0.5 (4), 0.7 (5), 0.9 (6), 1.0 (7)

#### Список литературы

1. Egorysheva A.V., Ellert O.G., et al. // J. Alloys Comp. 2013. V.579. P.311.

А.П. РУСИНОВ, М.Г. КУЧЕРЕНКО, А.В. ГОРШКОВ

*Оренбургский государственный университет*

## НЕКОГЕРЕНТНОЕ НАСЫЩЕНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ РАСТВОРОВ МОЛЕКУЛ ОРГАНИЧЕСКИХ КРАСИТЕЛЕЙ С ДОБАВЛЕНИЕМ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ

Показано, что в присутствии металлических наночастиц некогерентное насыщение поглощения растворов фотоактивных молекул уменьшается за счет появления в системе дополнительного канала безызлучательной релаксации. Результаты экспериментов по оптическому просветлению водных растворов флуоресцеина при стационарной лазерной накачке качественно подтверждают выводы теории.

A.P. RUSINOV, M.G. KUCHERENKO, A.V. GORSHKOV

*Orenburg State University*

## INCOHERENT ABSORPTION SATURATION SOLUTIONS OF PHOTOACTIVE MOLECULES IN THE PRESENCE OF METALLIC NANOPARTICLES

It is shown that in the presence of metallic nanoparticles incoherent absorption saturation solutions of photoactive molecules is reduced due to the appearance of an additional channel of nonradiative relaxation. Experimental results on absorption saturation of the fluorescein solutions at the stationary laser pumping are in good agreement with the theoretical conclusions.

При внедрении в поглощающий слой плазмонных металлических наночастиц с концентрацией фотохромных молекул  $n$  необходимо учитывать, что вероятности индуцированных  $w_{12}(I, \mathbf{r}) = w_{21}(I, \mathbf{r})$  и спонтанных  $\gamma(I, \mathbf{r})$  переходов становятся функциями пространственных координат  $\mathbf{r}$ , учитывающих расположение молекулы фотохрома относительно наночастицы, где  $I$  - интенсивность светового поля. Кроме того, необходимо учитывать появление безызлучательного канала дезактивации  $\gamma_n(I, \mathbf{r})$ , связанного с переносом энергии возбуждения фотохрома на плазмонные моды наночастиц (с их последующим затуханием) [1]. Тогда в квазистационарном приближении для режима постоянной накачки коэффициент поглощения системы определяем как

$$\alpha(I, \mathbf{r}) = \frac{\gamma(\mathbf{r}) + \gamma_n(\mathbf{r})}{2w_{12}(I, \mathbf{r}) + \gamma(\mathbf{r}) + \gamma_n(\mathbf{r})} \sigma n .$$

Из данного соотношения видно, что наличие наночастицы изменяет вероятности переходов и уменьшает насыщение среды в ближней локальной области, при этом пространственная зависимость коэффициента поглощения существенно зависит от амплитуды поля.

Эксперименты по оптическому просветлению водных растворов флуоресцеина показывают, что введение наночастиц серебра в раствор красителя приводит к уменьшению его некогерентного насыщения. Это связано с появлением в системе дополнительного канала безызлучательной релаксации, который уменьшает населенность возбужденных состояний молекул и увеличивает коэффициент поглощения раствора.

Работа поддержана грантами РФФИ № 15-08-04132, № 16-42-560671 и Минобрнауки №233.

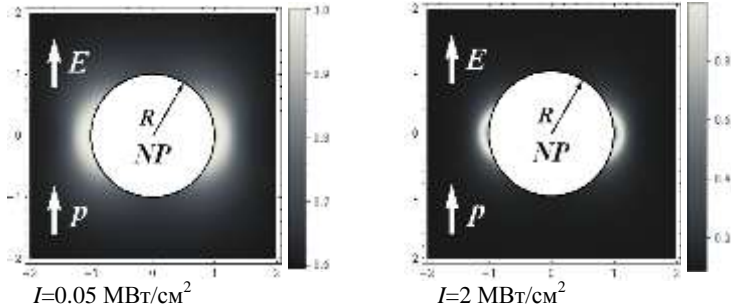


Рис. 1. Пространственное распределение локального коэффициента поглощения молекулы вблизи наночастицы металла

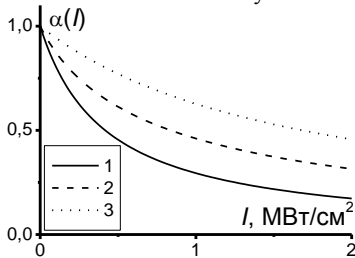


Рис. 2. Насыщение коэффициента поглощения фотоактивных молекул при различных концентрациях наночастиц.  
(1) – 0; (2) – 0.2; (3) – 0.5 нМ

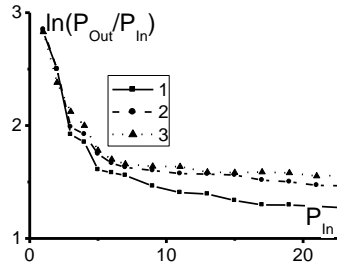


Рис. 3. Оптическое просветление водного раствора флуоресцеина  $C=0,5 \cdot 10^{-4}$  М, при различных концентрациях наночастиц:  
(1) – 0; (2) – 1.2; (3) – 1.8 нМ

*Список литературы*

1. Русинов А.П., Кучеренко М.Г. Вестник ОГУ. 2015. №13 (188). С.195-202.

О.И. ВОЛКОВА, А.Н. БАРАНОВ

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова***ИЗМЕНЕНИЕ СТЕПЕНИ АССОЦИИИ КРАСИТЕЛЕЙ  
В ОБРАТНЫХ МИЦЕЛЛАХ АОТ В ГЕПТАНЕ**

Обнаружено изменение степени ассоциации красителей в обратных мицеллах АОТ в гептане, уменьшение для родамина 6G и увеличение для эозина.

O.I. VOLKOVA, A.N. BARANOV

*Lomonosov Moscow State University***CHANGES IN THE DEGREE OF DISSOCIATION DYES  
IN AOT REVERSE MICELLES IN HEPTANE**

Change is detected the degree of association of dyes in AOT reverse micelles in heptane, a decrease of rhodamine 6G and to increase eosin.

Обратные мицеллы из ПАВ широко используются в науке и технологиях. В медицине в качестве доставки лекарств [1], в технологии как нанореакторы для производства наночастиц. Поэтому исследования таких систем продолжают оставаться актуальными.

Целью работы было определение агрегатного состояния красителей в обратных мицеллах АОТ в гептане.

Размеры обратных мицелл были определены методом динамического рассеяния света на корреляционном спектрометре *Photocor Compact* [2]. Размер мицелл изменялся при варьировании числа гидратации и концентрации красителя, в таблице радиусы мицелл от числа  $w$  гидратации для родамина 6G и эозина при концентрации красителей  $C=5 \cdot 10^{-3}$  моль/л.

$w$	0	19	37	56	74	93
$R_{R6G, HM}$	1,5	5	10	15	20	22
$R_{eosin, HM}$	1,5	3	8	11	15	19

На рис. 1 и 2 представлены спектры поглощения ионных красителей в воде и в мицеллярном растворе в 10%АОТ/90%гептан + водный раствор красителя концентрацией  $C=5 \cdot 10^{-3}$  моль/л. Методика спектральных измерений описана, например, в [3]. В случае R6G, рис. 1, в водном растворе родамин существует в виде димеров, спектр поглощения,

которых имеет максимум на длине волны 500 нм. В мицеллах спектр поглощения изменяется, пропадает полоса поглощения димеров и появляется полоса поглощения мономеров с максимумом на длине волны 540 нм. Это означает, что степень ассоциации родамина 6G резко уменьшается. В случае эозина, рис.2, увеличивается полоса с максимумом 490 нм, соответствующая димерам эозина. Такие изменения в спектрах свидетельствуют об увеличении количества димеров красителя, а значит и степени ассоциации, в обратных мицеллах. Причиной этого может быть взаимодействие положительно заряженных ионов родамина 6G с отрицательными зарядами АОТ на внутренней поверхности оболочки мицеллы, они притягиваются к поверхности и димеры родамина 6G разваливаются и степень ассоциации уменьшается. В случае эозина, заряд ионов красителя отрицательный и они отталкиваются от поверхности мицелл, что приводит к концентрированию ионов красителя и увеличению количества димеров и к увеличению степени ассоциации.

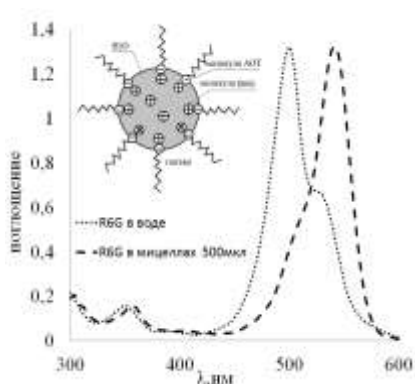


Рис. 1. Спектры поглощения R6G концентрацией  $C=5 \cdot 10^{-3}$  моль/л в воде и в мицеллярном растворе, на врезке схема обратной мицеллы с R6G.

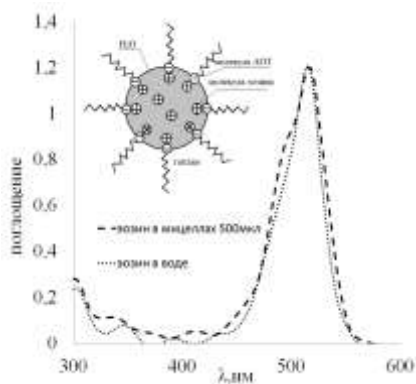


Рис. 2. Спектры поглощения эозина концентрацией  $C=5 \cdot 10^{-3}$  моль/л в воде и в мицеллярном растворе, на врезке схема обратной мицеллы с эозином

#### Список литературы

1. Марченко И.В. Модификация полиэлектролитных капсул наночастицами серебра и молекулами красителей и перенос энергии фотовозбуждения в этих системах.
2. <http://www.photocor.ru/theory/dynamic-light-scattering>.
3. Левшин Л.В., Салецкий А.М. Люминесценция и ее измерения. Молекулярная люминесценция.

Д.С. ОВЕЧЕНКО, А.П. БОЙЧЕНКО  
*Кубанский государственный университет, Краснодар*

## **ЛОКАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОХЕМИЛУМИНЕСЦЕНЦИИ НА АЛЮМИНИЕВОМ АНОДЕ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПОКРЫТИЯМИ**

На алюминиевых (Al) анодах в виде фольги, покрытых тонкими диэлектрическими слоями выявлено их влияние на интенсивность возникающей электрохемилюминесценции (ЭХЛ) при электролизе 0,008 М раствора щавелевой кислоты. Установлено резкое усиление ЭХЛ для Al-анода, покрытого пленками полипропилена и нитроцеллюлозы, создающих на поверхности металла условия образования электрического конденсатора за счет локального усиления электрического поля.

D.S. OVECHENKO, A.P. BOYCHENKO  
*Kuban State University, Krasnodar*

## **LOCALIZATION ELECTROCHEMILUMINESCENCE ON AN ALUMINUM ANODE WITH DIELECTRIC COATINGS**

On the aluminum (Al) foil as an anode coated with thin dielectric layers revealed their influence on intensity arising electrochemiluminescence (ECL) for electrolysis 0,008 M oxalic acid solution. A sharp increase in the ECL for Al-anode coated polypropylene films and nitrocellulose, creating conditions on the metal surface forming an electrical capacitor due to local electric field enhancement.

Имеющиеся к настоящему времени результаты исследований электрохемилюминесценции (ЭХЛ), возникающей при электролитическом анодировании алюминия (Al), существенно отстают от таковых по формированию оксида названного металла ( $Al_2O_3$ ) с данными о его различных свойствах, микро- и наноструктуре. Еще меньшее количество работ посвящено выявлению связи последних с интенсивностью и спектральным составом ЭХЛ, тогда как, например в [1] она явно прослеживается. Настоящая работа посвящена выявлению влияния тонких диэлектрических покрытий на характер локализации ЭХЛ у Al-анода в 0,008 М растворе щавелевой кислоты, обычно используемой для электролитического формирования нанопористой структуры  $Al_2O_3$ . В качестве покрытий Al-фольги использовались слои: желатины (ЖН) толщиной до 50 мк, полипропилена (ПП) 45 мк и нитроцеллюлозы (НЦ) до

80  $\mu$ , моделирующие электро-геометрические свойства  $Al_2O_3$  на различных стадиях его роста при постоянном напряжении  $128 \pm 0,1$  V.

Исследованиями установлено отсутствие каких-либо различий в свечении ЭХЛ на чистом металле и покрытом ЖН, тогда как под остальными покрытиями выявилась его четкая локализация с резким усилением яркости, что видно по фотографии на примере Al-анода с НЦ-покрытием (рис. 1). Причем, выделяющиеся пузырьки газа способствовали выявлению условий локализации и разгорания ЭХЛ. Определяющим в них является наличие диэлектрического барьера, очевидно отстоящем от

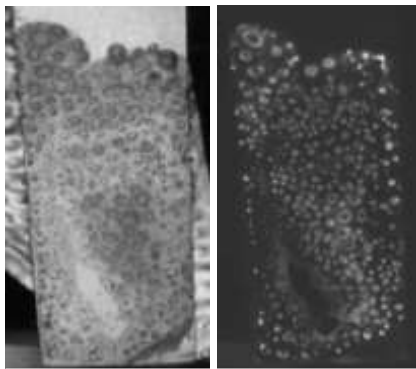


Рис. 1. Al-анод (фольга) с НЦ-покрытием (слева) и его ЭХЛ (справа)

поверхности металла на некотором критическом расстоянии  $d$ , превышение которого или его отсутствие ведет к резкому спаду яркости ЭХЛ вплоть до ее прекращения, что отчетливо наблюдается не только в местах прилегающего покрытия, но и по центральным областям образующихся под НЦ-пленкой (а также под ПП) крупных пузырьков. Создаваемое в этих областях наибольшее расстояние между металлом и верхней стороной газового диэлектрика ослабляет локальную напряженность электрического поля, ведя к снижению кинетики плазмохимических процессов [2]. Противоположная закономерность на периферии пузырьков и по всей площади микропузырьков. Поле в образуемом ими конденсаторе наибольшее, что способствует интенсификации названных процессов. Отсутствие различий ЭХЛ на аноде с ЖН-покрытием объясняется хорошей набухаемостью этого биополимера в водных электролитах и обретением от них высокой электропроводности, что лишает поверхность Al условий создания электрического конденсатора. В заключении отметим, что открытым пока остается вопрос о величине  $d$ .

#### *Список литературы*

1. Гриднев А.Е., Чернышев В.В. Спектры электролюминесценции анодного оксида алюминия в различных электролитах // Вестник ВГУ. 2005. №2. С.8-10.
2. Лазарук С.К., Кацуба П.С., Лешок А.А., Высоцкий В.Б. Влияние локальной напряженности электрического поля на формирование упорядоченной структуры пористого анодного оксида алюминия // ЖТФ. 2015. Т.85. Вып.9. С.86-90.

М.Д. ДМИТРИЕВА<sup>1</sup>, С.С. ХАРИНЦЕВ<sup>1</sup>, А.И. ФИШМАН<sup>1</sup>,  
А.М. АЛЕКСЕЕВ<sup>2</sup>, М.Х. САЛАХОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Казанский федеральный университет*

<sup>2</sup>*Институт перспективных исследований АН Республики Татарстан, Казань*

<sup>3</sup>*Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА В СКАНИРУЮЩЕЙ МИКРОСКОПИИ БЛИЖНЕГО ПОЛЯ НА ОСНОВЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ АЗОПОЛИМЕРНОЙ ТОНКОЙ ПЛЕНКИ**

В данной работе был продемонстрирован метод визуализации распределения ближнего поля на светочувствительной азополимерной пленке с помощью, сканирующей ближнеполевой микроскопии. Профиль интенсивности ближнего поля определяется на основе поверхностных деформаций азополимерной пленки под действием линейно-поляризованного света.

M.D. DMITRIEVA<sup>1</sup>, S.S. KHARINTSEV<sup>1</sup>, A.I. FISHMAN<sup>1</sup>,  
A.M. ALEKSEEV<sup>2</sup>, M. Kh. SALAKHOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Kazan Federal University*

<sup>2</sup>*Institute of Perspective Researches of Tatarstan Academy of Sciences, Kazan*

<sup>3</sup>*Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan*

## **VISUALIZATION OF OPTICAL NEAR FIELDS WITH PHOTOSENSITIVE AZOPOLYMERS**

In this work, we demonstrate a method to visualize optical near-fields on photosensitive azopolymer thin films with scanning near-field optical microscopy. A near-field intensity profile is determined in a basis of surface deformations of the azopolymer thin film exposed to linearly polarized light.

Контроль и управление поляризацией ближнего поля в сканирующей микроскопии ближнего поля (SNOM/NSOM) и спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния (TERS) позволяет детектировать молекулярные ориентации в исследуемых образцах [1], производить спектроскопические исследования одиночных молекул [2] и визуализировать объекты в видимом диапазоне за пределом дифракции света [3]. Контроль поляризации ближнего поля открывает путь к развитию 3D поляризационной TERS микроскопии [4] и флуоресцентной микроскопии ближнего поля [5].



Для исследования поляризации ближнего поля SNOM зонда была реализована схема сканирующего микроскопа ближнего поля в геометрии пропускания на основе сканирующего зондового микроскопа, интегрированного с конфокальным оптическим спектрометром NTEGRA SPECTRA (NT-MTD). В качестве тестового апертурного зонда был взят коммерческий зонд (MF003, NT-MTD). Для исследования поверхностных деформаций использовались пленки светочувствительного олигомера с ковалентно присоединенными нитроазобензольными хромофорами (ОАХФ). Топография полученных деформаций полимера была снята с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ). Темные области на рис. 2 соответствуют максимальной интенсивности света, поскольку максимальные поверхностные деформации возникают в области максимального градиента оптического поля.



Рис. 1. Схема экспериментальной установки

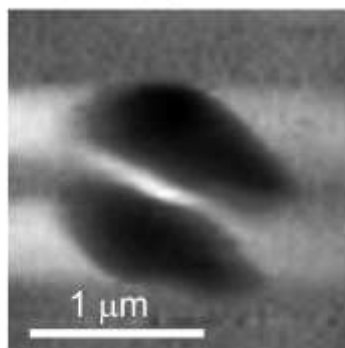


Рис. 2. Распределение интенсивности ближнего поля SNOM зонда на азополимере

#### Список литературы

1. Taubner T., Eilmann F., Hillenbrand R. // Opt. Express. 2005. V.13. P.8893.
2. Sonntag M. D., Klingsporn J.M., et al. // Phys. Chem. 2012. V.116. P.478.
3. Celebrano M., Kukura P., et al. // Nat. Photonics. 2011. V.5. P.95.
4. Florio G., Brundermann E., et al. // Soft Matter. 2014. V.10. P.1544.
5. Vickery S.A., Dunn R.C. // Biophys. J. 1999. V.76. P.1812.

Е.А. ЧЕРНЫХ<sup>1</sup>, С.С. ХАРИНЦЕВ<sup>1,2</sup>, А.И. ФИШМАН<sup>1</sup>,  
А.М. АЛЕКСЕЕВ<sup>2</sup>, М.Х. САЛАХОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Казанский федеральный университет

<sup>2</sup>Институт перспективных исследований АН Республики Татарстан, Казань

<sup>3</sup>Назарбаев университет, Астана, Казахстан

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СТЕКЛОВАНИЯ ТОНКИХ АЗОПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК В СВОБОДНОМ СОСТОЯНИИ И НА ПОДЛОЖКАХ С ПОМОЩЬЮ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ**

В данной работе мы демонстрируем результаты измерений температуры стеклования ( $T_g$ ) тонких (толщиной 5-500 нм) полимерных ОАХФ (эпоксидный олигомер с ковалентно присоединенным нитроазобензольным хромофором) ( $T_g=130^\circ\text{C}$ ) пленок в свободном состоянии и на подложках с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ). Мы предлагаем новый метод мониторинга температуры стеклования, где в качестве регистрируемого параметра выступает фаза колебаний АСМ кантилевера. Переход из стеклообразного состояния в высокоэластическое определяется по кривым зависимостям фазы от температуры образца.

Е.А. CHERNYKH<sup>1</sup>, S.S. KHARINTSEV<sup>1,2</sup>, A.I. FISHMAN<sup>1</sup>,  
A.M. ALEKSEEV<sup>3</sup>, M.Kh. SALAKHOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Kazan Federal University

<sup>2</sup>Institute of Perspective Researches of Tatarstan Academy of Sciences, Kazan

<sup>3</sup>Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan

## **A STUDY OF GLASS TRANSITION TEMPERATURE OF FREE-STANDING AND SUPPORTED AZOPOLYMER FILMS WITH ATOMIC FORCE MICROSCOPY**

In this work we report measurements of the glass transition temperature ( $T_g$ ) of thin (thickness 5-500 nm) polymeric blends on glass substrates and free-standing films of CFAO (epoxy oligomer covalently attached nitroazobenzol chromophore) by means atomic force microscopy (AFM). We propose a new method for monitoring the glass transition temperature, where as a registered parameter we use phase of cantilever oscillations. The transition from the glassy state to the rubbery determined by the curve characteristic-phase behavior of the cantilever with temperature of the sample.

Многочисленные исследования показывают, что температура стеклования критически зависит как от толщины пленки [1], так и от интерфейсного взаимодействия между полимерной пленкой и подложкой [2]. В связи с чем, мы исследуем температуру стеклования в азополимерных тонких пленок, эффект толщины и влияние подложки на  $T_g$ . Мы используем АСМ в полуконтактном режиме в качестве динамического механического анализатора, измеряющего кинетику колебаний кантилевера (регистрация фазы от температуры) во время нагрева образца температурным столиком с постоянной скоростью 5 °С/мин.

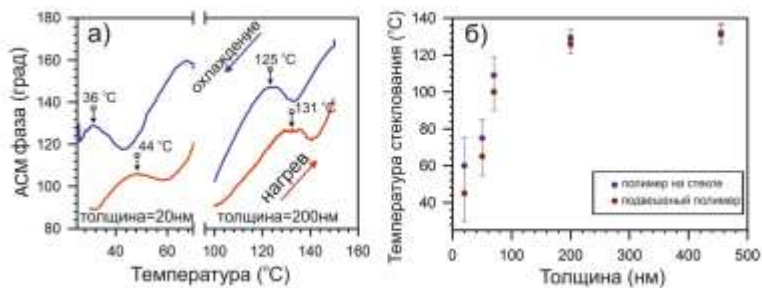


Рис. 1. График зависимости фазы колебаний кантилевера от температуры образца для пленок толщиной 20 нм и 200 нм (а); график зависимости температуры стеклования полимерных пленок на стеклянных подложках и подвешенных пленок от их толщины (б)

С помощью данного метода  $T_g$  определяется как температура, при которой воспроизводится скачок во время нагрева/охлаждения по кривым зависимостям фазы от температуры (рис.1а). На рис.1б представлен график зависимости температуры стеклования от толщины для свободно-подвешенных пленок и для пленок на подложке, убывающий характер которых отличается.

#### Список литературы

1. Keddie J. L., Jones R. A. L., et. al. // Faraday Discuss. 1994. V.98. P.219-230.
2. Fryer D.S., Richard D.P., et. al. // Macromolec. 2000. V.33. P.6439-6447.

Е.Н. КОТЛИКОВ, Ю.А. НОВИКОВА, Е.В. ЮРКОВЕЦ  
*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического  
приборостроения*

## ИЗМЕРЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ КОНСТАНТ ПЛЕНКИ $\text{CaY}_2\text{F}_8$

В работе описываются результаты измерений коэффициента преломления пленки  $\text{CaY}_2\text{F}_8$  в среднем ИК диапазоне спектра. При его нахождении используется коррекция оптических спектров пленок на поглощение.

E.N. KOTLIKOV, Ju.A. NOVIKOVA, E.V. IURKOVETS  
*State university of aerospace instrumentation, Saint-Petersburg*

## MEASUREMENT OPTIC CONSTANTS OF $\text{CaY}_2\text{F}_8$ FILM

Results of measurement refraction index of  $\text{CaY}_2\text{F}_8$  are showed in this paper. Correction of optic films for absorption is used in these calculations.

Среди фундаментальных оптических характеристик веществ одно из основных мест принадлежит оптическим константам (ОК) – показателю преломления  $n$  и показателю поглощения  $k$  [1]. Для проектирования многослойных интерференционных покрытий необходимо знание оптических констант пленок используемых веществ. В работе описывается спектрофотометрический метод определения ОК пленок  $\text{CaY}_2\text{F}_8$ . Для определения оптических констант использована методика, базирующаяся на исключение поглощения в спектрах. Для этого вычисляются поглощение отдельно в спектрах пропускания и отражения пленки [2] и они используются для коррекции экспериментальных спектров.

На рис. 1 представлены экспериментальные спектры пропускания и поглощения пленки  $\text{CaY}_2\text{F}_8$  (кривые  $T$  и  $A$ ) до коррекции и спектры пленки после коррекции (кривые  $T_{\text{корр}}$ ) на подложке из  $\text{ZnSe}$ . После коррекции поглощение в спектрах нулевое в области 2-12 мкм. Выше 14 мкм присутствует поглощение в подложке.

Рассмотрим метод расчет коэффициента преломления с использованием разработанной программы *FilmAnalysis* [3]. Сначала выделялся участок скорректированного спектра  $T_0(\lambda)$ , соответствующий первым трем экстремумам (1,45-2,1 мкм). По этому участку рассчитывались геометрическая толщина пленки  $h_2$  и среднее значение коэффициента преломления  $\langle n_2 \rangle$ .

Среднее значение  $\langle n_2 \rangle$  берется в качестве начального приближения. После этого исходный спектр разбивается на небольшие участки (шаги) по 5-10 точек, и для каждого соседнего участка (шага) ищется  $n_2$ , дающее минимальное расхождение исходного и рассчитанного спектров. Далее данные действия повторяются до конца спектра. На рис. 2 приведены результаты расчета коэффициента преломления пленки  $\text{CaY}_2\text{F}_8$  в диапазоне 2-10 мкм, полученные предложенным пошаговым методом [2].

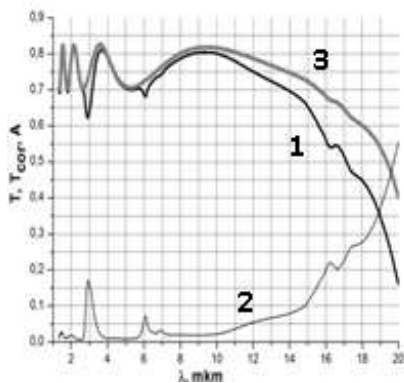


Рис. 1. Экспериментальные и скорректированные спектры пленки  $\text{CaY}_2\text{F}_8$ : 1 – спектр пропускания (кривая  $T$ ), 2 – спектр поглощения (кривая  $A$ ), 3 – скорректированный спектр пропускания (кривая  $T_{\text{корр}}$ )

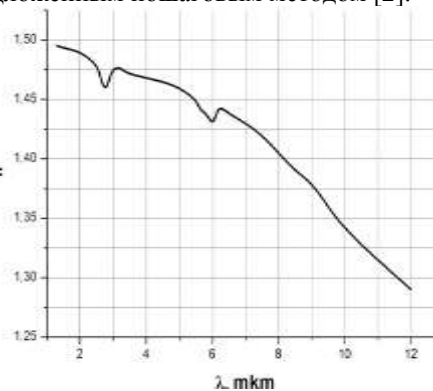


Рис. 2. Расчет коэффициента преломления пошаговым методом

По найденным значениям коэффициента преломления рассчитывался спектр пропускания по формулам, приведенным в [3]. Расчет погрешности определения  $n$  проводился с использованием формулы:

$$\Delta T = |T_{\text{экср}}(\lambda) - T_{n_2}(\lambda)|, \quad (1)$$

где  $T_{\text{экср}}(\lambda)$  – значение скорректированного на поглощение спектра пропускания пленки  $\text{CaY}_2\text{F}_8$ ,  $T_{n_2}(\lambda)$  – значение коэффициента пропускания, рассчитанного по найденным значениям коэффициента преломления. Величина погрешности  $\Delta T$  не превышала 0,1% на всем рассматриваемом диапазоне, что позволяет говорить о точности полученных результатов для  $n$  на уровне десятых процента.

#### Список литературы

1. Born M., Volf E. Principles of optics. Pergamon press ltd, 1959.
2. Kotlikov E.N., Iurkovets E.V. // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V.737. 012042.
3. Kotlikov E.N., Kotlikov A.N., Iurkovets E.V. // Сб. докл. научной сессии ГУАП. 2016. С.178.

Н.С. ТИХОМИРОВА<sup>1,2</sup>, В.А. СЛЕЖКИН<sup>1,2</sup>, А.Ю. ЗЮБИН<sup>2</sup>,  
В.В. БРЮХАНОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград*

<sup>2</sup>*Калининградский государственный технический университет*

**ПЛАЗМОННОЕ УСИЛЕНИЕ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ  
И КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ МОЛЕКУЛ  
ЭОЗИНА НА ПОВЕРХНОСТИ АНОДИРОВАННОГО  
АЛЮМИНИЯ, ДОПИРОВАННОГО НАНОЧАСТИЦАМИ  
СЕРЕБРА**

Установлено, что интенсивность флуоресценции молекул эозина увеличивается в 2,4 раза, а комбинационного рассеяния – в 4 раза.

N.S. TIKHOMIROVA<sup>1,2</sup>, V.A. SLEZHKIN<sup>1,2</sup>, A.Yu. ZYUBIN<sup>1</sup>,  
V.V. BRYUKHANOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Immanuel Kant Baltic Federal State University, Kaliningrad*

<sup>2</sup>*Kaliningrad State Technical University*

**PLASMONIC ENHANCEMENT OF FLUORESCENCE  
AND RAMAN SCATTERING THE EOSIN MOLECULES  
ON ANODISED ALUMINUM DOPED WITH SILVER  
NANOPARTICLES**

It is established that intensity of fluorescence eosin molecules is increased 2.4 times and Raman - 4 times.

Нанокompозитные пористые материалы применяются для создания химических и биологических сенсоров, оптоэлектронных устройств, эффективных гетерогенных катализаторов, фильтров для очистки воды. Среди пористых нанокompозитных материалов широко исследуются пленки анодного оксида алюминия (АОА), так как они обладают упорядоченной пористой структурой и узким распределением пор по размерам. Настоящая работа посвящена исследованию безызлучательных процессов переноса энергии электронного возбуждения между молекулами эозина и НЧ Ag на пористой поверхности АОА.

Анодирование алюминия проводили в течение 30 минут в 15%-ном растворе H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> при плотности тока 20 мА/см<sup>2</sup>. Внедрение молекул красителя в поры ОАО осуществляли в водном растворе эозина C<sub>0</sub> = 10<sup>-5</sup>

М, а адсорбцию НЧ (R-35 нм) Ag осуществляли из цитратного гидрозоля. Спектры комбинационного рассеяния (КР) изучали на исследовательской установке Centaur.

Результаты представлены на рис. 1. Из рис. 1а видно, что в зависимости от концентрации НЧ Ag наблюдается как плазмонное усиление интенсивности флуоресценции эозина в 2,4 раза, так и металлическое тушение флуоресценции. Усиление флуоресценции связано с безызлучательным процессом переноса плазмонной энергии НЧ Ag на электронные состояния молекул эозина [1]. Из рис. 1б видно, что наблюдается усиление интенсивности комбинационного рассеяния в 4 раза, а также сдвиг колебательных полос в КР-спектре молекул эозина и НЧ Ag на поверхности АОА на частотах  $503\text{ см}^{-1}$ ,  $683\text{ см}^{-1}$ ,  $829\text{ см}^{-1}$ ,  $1229\text{ см}^{-1}$ ,  $1374\text{ см}^{-1}$  (НЧ Ag),  $1553\text{ см}^{-1}$ .

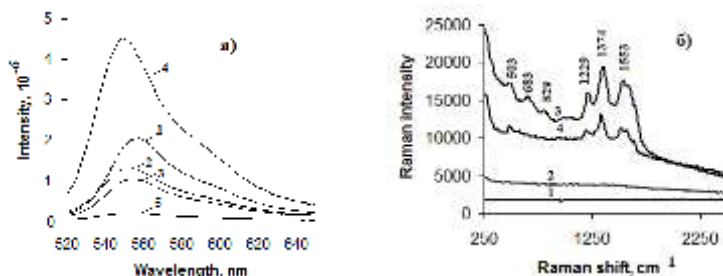


Рис. 1. Спектры флуоресценции эозина на поверхности АОА в присутствии НЧ Ag при возбуждении  $\lambda_{\text{возб}} = 500\text{ нм}$  (а): 1- без НЧAg, 2-0,0625  $C_{0\text{Ag}}/C_{\text{Ag}}$ , 3- 0,125  $C_{0\text{Ag}}/C_{\text{Ag}}$ , 4- 0,5  $C_{0\text{Ag}}/C_{\text{Ag}}$ , 5- 1  $C_{0\text{Ag}}/C_{\text{Ag}}$  и комбинационного рассеяния эозина (б): 1- без НЧ Ag, 2-0,0625  $C_{0\text{Ag}}/C_{\text{Ag}}$ , 3-0,125  $C_{0\text{Ag}}/C_{\text{Ag}}$ , 4-0,25  $C_{0\text{Ag}}/C_{\text{Ag}}$

Для образца с концентрацией НЧ  $C_{\text{Ag}} = 0,125 C_{0\text{Ag}}$  имеет место электромагнитное усиление комбинационного рассеяния света, вызванное локальными резонансами электронной плотности в НЧ серебра Ag на поверхности АОА [2]. Далее с увеличением концентрации НЧ Ag наблюдается уменьшение интенсивности комбинационного рассеяния.

Результаты получены в рамках государственного задания Минобрнауки России № 3.809.2014/К.

#### Список литературы

1. Брюханов В.В., Минаев Б.Ф., Цибульникова А.В. и др. Плазмонное усиление и тушение флуоресценции и фосфоресценции анионных и катионных красителей в различных средах // Оптический журнал. 2014. Т.81. № 1. С.7-14.
2. Набиев И.Р., Ефремов Р.Г., Чуманов Г.Д. Гигантское комбинационное рассеяние и его применение к изучению биологических молекул // УФН. 1988. Т.154. Вып.3. С 459-496.

А.О. ИСМАГИЛОВ, Н.В. АНДРЕЕВА, О.В. АНДРЕЕВА  
*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ НАНОПОРИСТЫХ СИЛИКАТНЫХ МАТРИЦ**

В данной работе приведены результаты исследования оптической неоднородности нанопористых силикатных матриц методом цифровой голографической интерферометрии.

A.O. ISMAGILOV, N.V. ANDREEVA, O.V. ANDREEVA  
*ITMO University, Saint-Petersburg*

## **RESEARCH OF OPTICAL HETEROGENEITY OF NANOPOROUS SILICATE MATRICES**

In this paper the results of research of optical heterogeneity of nanoporous silicate matrices by method of digital holographic interferometry are presented.

Нанопористые силикатные матрицы (НПМ) занимают особое место среди твердых нанопористых материалов, так как обладают свойствами, широко востребованными в современных научно-технических разработках. Это – высокая механическая и лучевая прочность в сочетании с высокой абсорбционной способностью и химической стабильностью; высокая прозрачность в видимой и ближней ИК областях спектра; возможность реализации широкого диапазона размеров пор и свободного объема пор; возможность регулировать оптические свойства образцов введением в свободный объем пор вещества с заданным показателем преломления; возможность получения образцов различных геометрических размеров; возможность получения композитных материалов с рабочим веществом в виде отдельных наночастиц, распределенных в микрообъёме [1].

Применение нанопористых силикатных матриц в настоящее время, главным образом, связано с прозрачностью таких стекол в видимой области спектра и возможностью получения образцов оптического качества [2].

Целью работы являлось исследование влияния отдельных этапов химической обработки на формирование фазовой структуры нанопористых силикатных матриц. В эксперименте использовались НПМ, изготавливаемые из натриевоборосиликатного двухфазного стекла ДВ-1.



Исследуемые образцы изготавливались в виде дисков диаметром 15 мм и толщиной 1 мм и в виде плоскопараллельных пластин, прошедших стадию глубокой шлифовки и полировки.

При изготовлении нанопористых силикатных матриц, был соблюден технологический регламент, позволяющий воспроизводить заданные характеристики НПМ от партии к партии.

Оценка оптической однородности исследуемых образцов производилась методом цифровой голографической интерферометрии на экспериментальном стенде для исследования фазовых трансформаций прозрачных объектов.

Производилось сравнение и анализ данных по изменению фазовых характеристик каждого образца в процессе изготовления нанопористых матриц с заданными характеристиками.

“Фазовые портреты” образцов были получены в исходном состоянии (заготовка) и на каждом этапе химической обработки. При этом изменялось положение образцов в поле силы тяжести, чтобы получить информацию об изменении однородности, как в результате химической обработки, так и положении образца.

Основным критерием степени однородности являлось изменение свободного объема пор от центра к краям образца. Величина свободного объема контролировалась весовым методом.

По результатам проведенной работы были выбраны варианты расположения образца, позволяющие получить максимальную оптическую однородность нанопористых матриц с заданными характеристиками.

#### *Список литературы*

1. Андреева О.В., Обыкновенная И.Е. // Наносистемы: физика, химия, математика. 2010. Т.1. №1. С.37-53.
2. Мешковский И.К. Композиционные оптические материалы на основе пористых матриц. СПб.: Изд. СПбГУ ИТМО, 1998.

А.И. ЧЕРНОВ<sup>1,2</sup>, П.В. ФЕДОТОВ<sup>1</sup>, Е.Д. ОБРАЗЦОВА<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **ИЗМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОДНОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ПРИ ИХ ЗАПОЛНЕНИИ ПОЛОСАМИ ГРАФЕНА**

Одностенные углеродные нанотрубки могут служить нанореакторами для создания полос графена внутри. После заполнения молекулами и формирования инкапсулированных структур оптические свойства нанотрубок изменяются. При помощи спектроскопии оптического поглощения света и фотолюминесцентной спектроскопии было обнаружено, что различные геометрии нанотрубок в разной степени меняют свои оптические свойства. Обнаружены смещения в энергиях оптических переходов, усиление интенсивности фотолюминесценции. Изменения могут быть обусловлены передачей энергии, диэлектрическим экранированием и механическим расширением.

A.I. CHERNOV<sup>1,2</sup>, P.V. FEDOTOV<sup>1</sup>, E.D. OBRAZTSOVA<sup>1,2</sup>

*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*

<sup>2</sup>*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*

## **ADJUSTMENT OF SINGLE-WALLED CARBON NANOTUBES OPTICAL PROPERTIES VIA GRAPHENE NANORIBBONS ENCAPSULATION**

Single-walled carbon nanotubes were used as templates for the formation of graphene nanoribbons. Optical properties of the filled nanotubes become modified and depend on the used molecules and type of graphene nanoribbons. Absorption spectroscopy and photoluminescence spectroscopy allowed detecting the variation of optical properties changes with respect to the exact nanotube geometry. We detect the shifts in the energies of the optical transitions and differences in the fluorescence intensities corresponding to the filled nanotubes. The origin of the shifts is explained by energy transfer, dielectric screening and mechanical strain induced by the formation of graphene nanoribbons.

Заполнение одностенных углеродных нанотрубок (ОУН) молекулами позволяет производить точную подстройку оптических свойств нанотрубок [1, 2]. В работе использовались молекулы коронена, которые помещались внутрь ОУН и полимеризацией преобразовывались в полосы графена [3, 4]. Электронная структура полос графена зависит от их

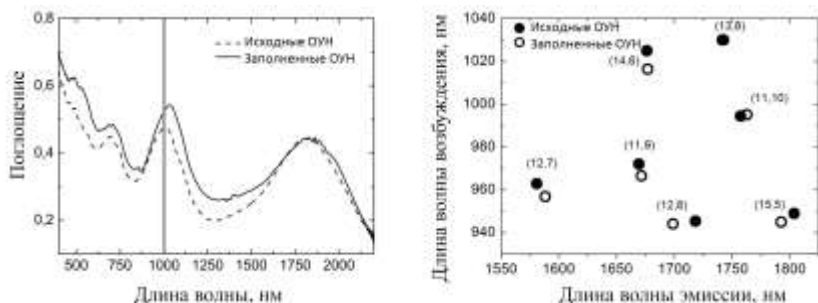


Рис. 1. Слева спектры оптического поглощения исходных (прерывистая линия) и заполненных нанотрубок (сплошная линия). Справа – двумерная карта фотолуминесценции с обозначением длин волн эмиссии и возбуждения для отдельных геометрий нанотрубок до (сплошной черной цвет) и после заполнения (белый цвет с черной окантовкой)

ширины, геометрии, формы краев и типов атомов на краях. При этом сами ОУН, в зависимости от геометрии, могут быть как металлами, так и полупроводниками с разной шириной запрещенной зоны. В работе были изучены оптические свойства заполненных ОУН с различными геометриями. При помощи спектроскопии оптического поглощения света обнаружено уширение спектральной полосы первого оптического перехода полупроводниковых ОУН после заполнения. Формирование полос графена внутри ОУН может приводить к усилению фотолуминесценции отдельных геометрий нанотрубок. Изменение значений энергий оптических переходов и усиление интенсивности фотолуминесценции могут быть объяснены передачей энергии между внутренней структурой и внешней ОУН, диэлектрическим экранированием, а также механическим расширением нанотрубок после заполнения.

Работа поддержана грантами РФФИ 15-32-70005, 16-02-00979.

#### Список литературы

1. Fedotov P.V., Eremina V.A., Tonkikh A.A., Chernov A.I., Obratsova E.D. // PSS (b). 2016. doi 10.1002/pssb.201600236.
2. Tonkikh A.A., Rybkovskiy D.V., Orekhov A.S., Chernov A.I., Khomich A.A., Ewels C.P., Kauppinen E.I., Chuvilin A.L., Obratsova E.D. // Carbon. 2016. 109. 87.
3. Fedotov P.V., Chernov A.I., Obratsova E.D., et al. // J. Nanoelectron. Optoelectron. 2013. 8. 16.
4. Chernov A.I., Fedotov P.V., Krylov A.S., Vtyurin A.N., Obratsova E.D. // J. Nanoelectron. Optoelectron. 2016. 10 (1). 012504.

А.Д. МОЛЧАНОВА, Е.М. МОШКИНА<sup>1</sup>, К.Н. БОЛДЫРЕВ*Институт спектроскопии РАН, Троицк**<sup>1</sup>Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск*

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В МНОГОПОДРЕШЕТОЧНОМ МАГНЕТИКЕ $\text{Cu}_x\text{Mn}_{1-x}\text{B}_2\text{O}_4$ МЕТОДАМИ ОПТИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Представленная работа продолжает и дополняет исследование фазовой диаграммы метабарата меди  $\text{CuB}_2\text{O}_4$  [1]. Ранее нам удалось прояснить характер магнитных фазовых переходов в  $\text{CuB}_2\text{O}_4$  и разрешить разногласия касательно магнитной структуры и возможности управления кристаллической киральностью при помощи внешнего магнитного поля [2, 3]. В настоящей работе приведено исследование магнитных фазовых переходов метабарата меди, легированного марганцем  $\text{Cu}_{1-x}\text{Mn}_x\text{B}_2\text{O}_4$ .

A.D. MOLCHANOVA, E.M. MOSHKINA<sup>1</sup>, K.N. BOLDYREV*Institute for Spectroscopy of the RAS, Troitsk**<sup>1</sup>Kirensky Institute of Physics SB RAS, Krasnoyarsk*

## INVESTIGATION OF MAGNETIC PHASE TRANSITIONS IN MULTI-SUBLATTICE MAGNET $\text{Cu}_x\text{Mn}_{1-x}\text{B}_2\text{O}_4$ BY OPTICAL POLARIZATION SPECTROSCOPY

This work continues and complements the study of the phase diagram of copper metaborate  $\text{CuB}_2\text{O}_4$  [1]. Previously, we have clarified the nature of magnetic phase transitions in  $\text{CuB}_2\text{O}_4$  and resolved the dispute concerning the magnetic structure and possibility of crystal chirality control by an external magnetic field [2, 3]. This paper presents the study of the magnetic phase transitions of manganese-doped copper metaborate  $\text{Cu}_{1-x}\text{Mn}_x\text{B}_2\text{O}_4$ .

Метаборат меди обладает сложной кристаллической и магнитной структурами. Его примитивная ячейка содержит две различные позиции ( $4b$  и  $8d$  с симметрией  $S_4$  и  $C_2$ ) магнитного иона  $\text{Cu}^{2+}$  ( $S = 1/2$ ). В обеих позициях медь квадратно координирована, как и в высокотемпературных сверхпроводниках. При этом, магнитная подсистема меди ( $4b$ ) упорядочивается при  $T_N = 21$  К, а затем претерпевает изменения при температурах 8.5 К и 7.9 К [1], в то время как квазиодномерная подсистема меди в позиции  $8d$ , напротив, не упорядочивается даже при

самых низких температурах. Конкуренция различных внутри- и междосистемных обменных взаимодействий и геометрическая фрустрация обменов приводят к сложной фазовой диаграмме  $\text{CuV}_2\text{O}_4$  с различными магнитными структурами и многочисленными спонтанными и индуцированными полем фазовыми переходами.

Настоящая работа посвящена исследованию магнитных фазовых переходов метабората меди с примесью марганца  $\text{Cu}_{1-x}\text{Mn}_x\text{V}_2\text{O}_4$ . Ожидалось, что легирование марганцем приведёт к интересным магнитным эффектам и изменениям в фазовой диаграмме метабората меди. Измеренные температурная и полевая зависимости спектров пропускания позволили прояснить нетривиальную картину магнитных фазовых переходов  $\text{Cu}_{1-x}\text{Mn}_x\text{V}_2\text{O}_4$  и провести сравнение фазовых диаграмм легированного марганцем и «чистого» метаборатов (см рис. 1). Полученные результаты интересны в контексте создания новых быстрых магнитооптических устройств и устройств спинтроники.

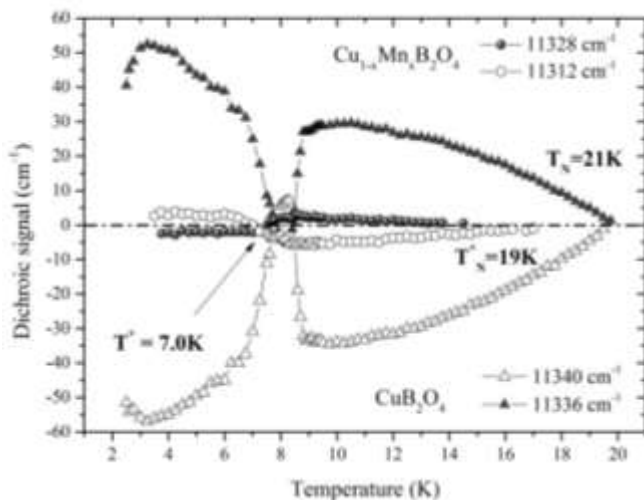


Рис. 1. Сравнение температурных зависимостей ЛМД для  $\text{CuV}_2\text{O}_4$  и  $\text{Cu}_{1-x}\text{Mn}_x\text{V}_2\text{O}_4$

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №15-02-07451 и гранта Президента РФ для поддержки молодых ученых (МК-3521-2015.2).

*Список литературы*

1. Boldyrev K.N., Pisarev R.V., et al. // Phys. Rev. Lett. 2015. V.114. P.247210.
2. Saito M., Ishikawa K., Taniguchi K., Arima T. // Phys. Rev. Lett. 2008. V.84. P.117402.
3. Lovesey S.W., Stadub U. // J. Phys. Condens. Matter. 2009. V.21. P.142201.

Д.А. КОЗЛОВА, С.А. ИВАНОВ, И.С. ПИЧУГИН  
*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

**ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНОГО  
АКТИВАТОРА НА ДИНАМИКУ ПОЛОСЫ ПЛАЗМОННОГО  
РЕЗОНАНСА В ФОТОТЕРМОРЕФРАКТИВНОМ СТЕКЛЕ**

В работе проведено экспериментальное сравнение кинетики роста кристаллической фазы в активированном фототермоурефрактивном стекле с переменной концентрацией редкоземельного активатора.

D.A. KOZLOVA, S.A. IVANOV, I.S. PICHUGIN  
*ITMO University, Saint-Petersburg*

**INFLUENCE OF RARE EARTH ACTIVATOR CONCENTRATION  
ON THE DYNAMICS OF THE PLASMON RESONANCE BAND  
IN PHOTO-TERMO-REFRACTIVE GLASS**

In present work experimental investigation of crystal growth kinetics was made for PTR glass doped with different rare earth concentrations.

В настоящее время к устройствам лазерной техники предъявляются повышенные требования к выходному излучению. Использование распределённого брэгговского отражателя (РБО) и распределённой обратной связи (РОС) позволяет получить одночастотное излучение. Одним из способов формирования РОС и РБО структур является запись объёмных брэгговских решёток в объёме активного элемента. Для выполнения этой задачи необходима среда, обладающая голографическими характеристиками. Перспективным материалом для записи объёмных брэгговских решёток служит фототермоурефрактивное (ФТР) стекло, которое в отличие от органических сред обладает высокой химической, термической и механической прочностью, что позволяет применять его без каких-либо защитных покрытий. Также ФТР стекло является гибким материалом, что позволяет различным образом модифицировать его состав, например, легировать редкоземельными ионами (РЗИ). Это открывает перспективы создания РБО и РОС лазеров на его основе.

В основе записи голограмм лежит двухступенчатый процесс ФТИ кристаллизации, в результате которого происходит формирование

коллоидных наночастиц серебра, рост оболочки и нанокристаллов NaF, ответственных за локальное изменение показателя преломления. На первом этапе происходит облучение стекла УФ излучением. Второй этап - термообработка (ТО), состоящая из нагрева и выдержки при заданной температуре. Для подробного рассмотрения процессов, происходящих в стекле температура ТО была снижена до 473°C, что ниже температуры стеклования.

Введение РЗИ в стекло повышает вязкость и температуру стеклования, что сказывается на динамике роста оболочки и кристаллической фазы. Таким образом, целью работы является исследование влияния концентрации редкоземельного активатора на процесс ФТИ кристаллизации ФТР стекла.

Для проведения исследования были синтезированы ФТР стёкла с переменной концентрацией РЗИ, при этом содержание компонентов, участвующих в процессе ФТИ кристаллизации оставалось неизменным.

После нагрева образцов до 473°C для всех образцов производились измерения спектров поглощения каждые 30 минут. При каждом последующем увеличении времени ТО образцы помещались в предварительно разогретую печь. На полученных спектрах наблюдается сдвиг максимума полосы плазмонного резонанса в длинноволновую область, а при дальнейшем увеличении времени ТО - в коротковолновую. Длинноволновый сдвиг обусловлен ростом оболочки из AgBr и NaBr на серебряной наночастице. Продолжение ТО приводит к росту кристаллической фазы, в результате чего происходит коротковолновый сдвиг.

В полученных по результатам работы спектрах поглощения отчётливо наблюдается замедление кинетики процесса ФТИ кристаллизации для стёкол, содержащих ионы редкоземельного активатора. Для всех типов образцов положение полосы по прошествии определённого времени приходит в одну точку, 444 нм, а увеличение концентрации РЗИ приводит к увеличению этого времени. Это свидетельствует о том, что в результате процесса ФТИ кристаллизации в стёклах формируются идентичные структуры из металлической наночастицы, оболочки и кристаллической фазы.

Д.И. ЧЕРНАКОВ<sup>1</sup>, А.И. СИДОРОВ<sup>1,2</sup>, М.В. СТОЛЯРЧУК<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ»*

## **ФОРМИРОВАНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО ВОЛНОВОДА В ФОТОТЕРМОРЕФРАКТИВНОМ СТЕКЛЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ**

Приведены результаты экспериментов по изменению показателя преломления области в фототермоурефрактивных (ФТР) стеклах с серебром при облучении ультрафиолетовым (УФ) излучением. Показано, что воздействие УФ-излучения приводит к увеличению показателя преломления стекла и появлению люминесценции.

D.I. CHERNAKOV<sup>1</sup>, A.I. SIDOROV<sup>1,2</sup>, M.V. STOLYARCHUK<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>*Saint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI»*

## **CREATING A LUMINESCENT WAVEGUIDE IN PHOTO-THERMO-REFRACTIVE GLASS BY UV RADIATION**

The result of experiments on the changing of the refractive index of photo-thermo-refractive (PTR) glass with silver by UV irradiation. It was shown that an exposure to UV radiation results to an increase of the refractive index of the glass and the appearance of the luminescence.

В настоящее время оптические волноводы находят широкое применение во многих сферах науки и техники. Они служат для передачи оптического сигнала в интегральных оптических схемах, могут составлять основу оптических сенсоров, применяться как инструмент для научных исследований или служить для решения инженерных задач. Существует множество методов получения волноводов в стекле. Большинство из них требует специального оборудования для нанесения волноводных слоев или процесса ионного обмена [1]. ФТР-стекла представляют собой силикатные стекла, содержащие серебро, фотосенсибилизатор – ионы церия и восстановитель – ионы сурьмы [2]. Метод создания волноводной области в ФТР-стекле путем облучения УФ-излучением в силу своей простоты и высокой скорости получения может оказаться достойной альтернативой существующим более трудоемким и долгим методам.



Целью работы является экспериментальное исследование изменения показателя преломления ФТР-стекла под воздействием УФ-излучения и возможности использования этого эффекта для создания люминесцентных волноводов в стеклах. В качестве источников УФ-излучения использовались УФ-лампа с широким спектром излучения и лазерное излучение длины волны  $\lambda = 355$  нм. Показано, что в результате воздействия УФ-излучения происходит увеличение показателя преломления стекла и формирование оптического волновода. Причиной данного эффекта является трансформация заряженных молекулярных кластеров серебра в нейтральные [3]. Это подтверждается появлением интенсивной люминесценцией на облученном участке стекла (рис. 1) и появлением полос поглощения, соответствующих нейтральным молекулярным кластерам серебра ( $Ag_2$ ,  $Ag_3$ ,  $Ag_4$ ). Данные полосы поглощения приводят к увеличению показателя преломления на основании соотношения Крамерса-Кронига. Кроме того, численное моделирование методом теории функционала плотности показало, что нейтральные молекулярные кластеры серебра обладают более высокой поляризуемостью по сравнению с заряженными.



Рис. 1. Люминесценция торца волновода, записанного УФ-излучением, длина волны возбуждения 405 нм

Полученный эффект может быть использован при создании люминесцентных волноводных и волоконных датчиков, а также в устройствах интегральной оптики.

#### *Список литературы*

1. Nikonorov N.V., Sidorov A.I., Tsekhomskii V.A. Silver nanoparticles in oxide glasses: technologies and properties // *Silver Nanoparticles* /ed. by D.P. Perez. Vukovar, 2010. P.177.
2. Tervonen A., West B.R., Honkanen S. // *Opt. Eng.* 2011. V.50. P.071107.
3. Dubrovin V.D., Ignatiev A.I., Nikonorov N.V., Sidorov A.I., Shakhverdov T.A., Agafonova D.S. // *Optical Materials.* 2014. V.36. P.753-759.

В.А. КРЫКОВА, С.А. ИВАНОВ, В.Д. ДУБРОВИН  
*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ХЛОРИДНОГО ФОТОТЕРМОРЕФРАКТИВНОГО СТЕКЛА**

В работе были исследованы свойства голограмм на хлоридном фототермоорефрактивном (ФТР) стекле. Был определён характер дозовой зависимости амплитуд модуляций показателей преломления и поглощения стекла от экспозиции и длительности термообработки. Максимальное значение изменения показателя преломления составило  $16 \cdot 10^{-4}$ , что сопоставимо с фторидным ФТР-стеклом.

V.A. KRYKOVA, S.A. IVANOV, V.D. DUBROVIN  
*University ITMO, Saint-Petersburg*

## **HOLOGRAPHIC PROPERTIES ON CHLORIDE PHOTO-THERMO-REFRACTIVE GLASS**

Properties of holograms in chloride photo-thermo-refractive (PTR) glass were studied in this work. We studied the dependence of the refractive index modulation amplitude and absorption coefficient of the glass on the exposure and heat treatment duration. And also maximum values of the refractive index modulation amplitude and absorption coefficient were identified.

Фототермоорефрактивное (ФТР) стекло – перспективный материал для создания различных дифракционных и голографических оптических элементов. В первую очередь это обусловлено высокой механической и химической стойкостью, что позволяет использовать данный материал без дополнительных защитных покрытий, в отличие от органических полимерных сред. Также ФТР-стекло прозрачно в ближнем ИК и видимой области спектра. Голограммы, записанные на этом стекле, являются чисто фазовыми и могут использоваться в широком спектральном диапазоне. Значение дифракционной эффективности может достигать 99 %, а максимальное изменение показателя преломления составляет  $20 \cdot 10^{-4}$ . В основе записи голограмм на ФТР-стекле лежит процесс фототермоиндуцированной (ФТИ) кристаллизации, в результате которого происходит локальное уменьшение показателя преломления в облучённой области [1]. Такой характер изменения делает невозможным использование ФТР-стекла для создания каких-либо волноводных

структур. С целью получить материал, в котором в результате схожих процессов ФТИ кристаллизации происходит увеличение показателя преломления, было разработано хлоридное ФТР-стекло. По составу данный материал отличается от исходного ФТР-стекла уменьшенным содержанием NaF, отсутствием Вг и наличием NaCl, что приводит к выделению после ФТИ кристаллизации фазы, имеющей больший показатель преломления, чем исходное стекло.

Целью данной работы является исследование голографических свойств хлоридного ФТР стекла.

Для проведения исследования были записаны голограммы с различными дозами облучения при помощи He-Cd лазера. Термообработка образцов производилась в программируемой муфельной печи при температуре 546 градусов в течение 3 часов. После тепловой обработки, для определения амплитуд модуляции показателей поглощения ( $a_1$ ) и преломления ( $n_1$ ) стекла производилось изменение контуров угловой селективности голограмм на длине волны 632,8 нм, которая попадает на край полосы поглощения плазмона. Для определения характера зависимости  $a_1$  и  $n_1$  от длительности термообработки и максимального изменения показателя преломления стекла, время выдержки образцов в термообработочном муфеле увеличивалось с шагом в 3 часа, пока в образцах не переставали происходить изменения. Каждый раз, при увеличении времени обработки, образцы устанавливались в предварительно разогретую печь. Для определения величины вклада амплитудной и фазовой составляющих в периодическую структуру использовалась методика измерения, описанная в работе [1], а также материал из работы [2].

В результате исследования был установлен характер дозовой зависимости амплитуды модуляции показателей поглощения и преломления хлоридного ФТР-стекла. Была определена продолжительность процесса термообработки, при которой достигается максимальное значение изменения показателей поглощения и преломления стекла. Максимальное значение изменения показателя преломления составило  $16 \cdot 10^{-4}$ , что сопоставимо с фторидным ФТР-стеклом. Изменение показателя поглощения практически соответствует наведённому поглощению в стекле.

#### *Список литературы*

1. Иванов С.А., Игнатьев А.И., Никоноров Н.В., Асеев В.А. //Оптический журнал. 2014. Т.81. №6. С.72-77.
2. Carretero L., Madrigal R.F., Fimia A., Blaya S., Beléndez A. // Optics letters. 2001. V.26. No 11. P.786-788.

А.Н. БАБКИНА, К.И. ТРОЦЬ, Н.В. НИКОНОРОВ  
*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **ОБРАЗОВАНИЕ ЦЕНТРОВ ОКРАСКИ В БОРАТНЫХ СТЕКЛАХ С НАНОКРИСТАЛЛАМИ CuCl ПОД ДЕЙСТВИЕМ УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ**

Рассмотрены результаты исследования по влиянию импульсного лазерного излучения ультрафиолетового (УФ) диапазона на спектральные свойства калиевоалюмоборатных стекол, активированных нанокристаллами хлорида одновалентной меди. Показано уменьшение пропускания боратного стекла в видимой области, связанное с образованием в процессе облучения стабильных при комнатной температуре центров окраски  $Cu_n$ .

A.N. BABKINA, K.I. TROTS, N.V. NIKONOROV  
*ITMO University, Saint-Petersburg*

## **COLOR CENTERS FORMATION IN BORATE GLASSES WITH CuCl NANOCRYSTALS UNDER UV IRRADIATION**

The results of the study of the pulsed UV laser radiation effect on the spectral properties of the potassium-aluminium-borate glasses doped with the copper chloride nanocrystals are discussed. The effect of the irreversible photochromism associated with the formation of the temperature stable  $Cu_n$  color centers is demonstrated in the borate glasses.

Непрерывное воздействие излучением УФ-диапазона на боросиликатные (БС) стёкла, активированные нанокристаллами (НК) CuCl (марка ФХС-7), приводит к уменьшению их пропускания в видимой области за счет образования центров окраски [1], дальнейшее отключение активирующего излучения приводит к восстановлению исходного уровня пропускания. Калиевоалюмоборатные (КАБ) стекла с нанокристаллами CuCl при облучении импульсным излучением с длиной волны 532 нм демонстрируют эффект нелинейно-оптического ограничения [2], оставаясь устойчивыми к воздействию излучения УФ-диапазона [3].

Объектом исследования были выбраны КАБ стекла следующего состава:  $18 K_2O-29 Al_2O_3-35,4 B_2O_3-4,3 SiO_2-1,8 Cu_2O-5 P_2O_5-2,8 Na_2O-1,4 Cl^- -0,78 F^-$  (мас %). Выделение в матрице стекла нанокристаллов CuCl происходило в процессе закалки после термообработки при температурах, превышающих или равных температуре стеклования ( $T_g=654 K$ ).

Облучение стекла производилось третьей гармоникой импульсного лазера на основе ИАГ: $\text{Nd}^{3+}$  с длиной волны 355 нм, длиной импульса 9 нс, пиковой мощностью  $13,2 \text{ МВт/см}^2$  и частотой 10 Гц. До и после облучения проводилась регистрация спектров поглощения образцов с помощью спектрофотометра Lambda 600 (*Perkin Elmer*).

Рис. 1 иллюстрирует влияние облучения лазерным излучением на спектры поглощения КАБ стекла с НК  $\text{CuCl}$  со средним размером 31 Å. Облучение стекла в течение 60 секунд приводит к сдвигу максимума полосы поглощения с 361 нм (3,44 эВ) до 366 нм (3,39 эВ), что свидетельствует об увеличении среднего размера кристаллов до 44 Å. Последующее облучение стекла способствует увеличению поглощения в диапазоне 330-500 нм. На рис. 2 показана кинетика изменения оптической плотности КАБ стекла и коммерческого фотохромного стекла марки ФХС-7 на длине волны 500 нм от длительности облучения. Последующая выдержка облученных образцов при комнатной температуре показала временную стабильность центров окраски в КАБ стекле и релаксацию центров окраски в БС стекле. Кратковременное (до 1 минуты) облучение лазерным излучением инициирует в КАБ стекле процесс роста кристаллов за счет распределенной вокруг нанокристаллической фазы. Этот процесс не происходит в БС стекле, поэтому прирост индуцированного поглощения в нём больше. Дальнейшее облучение создает избыток свободных электронов, которые восстанавливают одновалентные ионы меди до атомарного состояния. В условии большой локализации атомов меди происходит их агрегация в кластеры  $\text{Cu}_n^0$  ( $n > 13$ ), которые обладают поглощением в области 380-540 нм.

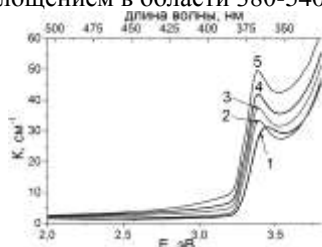


Рис. 1. Спектры поглощения КАБ стекла до облучения (1) и после облучения в течение 60 с (2), 300 с (3), 600 с (4), 1200 с (5)

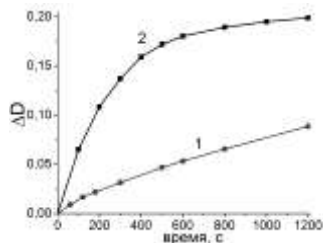


Рис. 2. Кинетика изменения оптической плотности КАБ стекла (1) и стекла ФХС-7 (2) от длительности облучения

#### Список литературы

1. Araujo R. // *J. Non. Cryst. Solids*. 1998. V.223. P.53-56.
2. Shirshnev P.S., Nikonov N.V., et al. // *Opt. Laser Technol. Proc.* 2015. V.1. P.108-112.
3. Ширшнев П.С. Диссертация канд. физ.-мат. наук. СПб НИУ ИТМО, 2013.

М.В. СТОЛЯРЧУК<sup>1</sup>, П.В. КОЧЕТКОВ<sup>1</sup>, А.И. СИДОРОВ<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ»*

## **РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МОЛЕКУЛЯРНЫХ КЛАСТЕРОВ Ag-Cu В ФОСФАТНЫХ СТЕКЛАХ ИЗ ПЕРВЫХ ПРИНЦИПОВ**

Представлены результаты квантовохимического анализа оптических свойств биметаллических молекулярных кластеров  $Ag_nCu_m$  и взаимодействие последних с дефектами в фосфатных стеклах, образованных после рентгеновского облучения. Показано, что замещение атомов серебра в кластере на атомы меди приводит к смещению электронных спектров в область малых энергий. Проводится сравнение с ранее полученными экспериментальными данными.

M.V. STOLYARCHUK<sup>1</sup>, P.V. KOCHETKOV<sup>1</sup>, A.I. SIDOROV<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>*Saint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI»*

## **AB INITIO CALCULATIONS OF OPTICAL PROPERTIES OF Ag-Cu MOLECULAR CLUSTERS IN PHOSPHATE GLASSES**

The results of quantum chemical analysis of optical properties of bimetallic molecular clusters  $Ag_nCu_m$  are presented. In addition, their interaction with defects in phosphate glasses after x-ray irradiation is also studied. It is shown that copper doping of pure silver clusters causes the red shift of electronic absorption spectra. The comparison of obtained results and experimental data is also provided.

Субнаноразмерные молекулярные кластеры (МК) благородных металлов (Cu, Ag, Au), состоящие из нескольких атомов, представляют промежуточное состояние между отдельными атомами и плазмонными наночастицами. Электронная структура таких МК зависит от их размера и состава, что отражается на необычных физико-химических свойствах. Так МК Ag, находящиеся в различных средах, обладают интенсивной люминесценцией в видимой области спектра [1] и могут быть использованы для разработки люминесцентных материалов [2]. Добавление одного или более иных химических элементов может

выступать в качестве дополнительного фактора, позволяющего создавать материалы с более гибкими, контролируруемыми свойствами.

Ранее экспериментально было продемонстрировано [3], что в цинкофосфатных стеклах, легированных ионами серебра и меди, после облучения рентгеновским излучением образуются люминесцентные центры, предположительно представляющие смешанные МК  $Ag_nCu_m$ .

Квантовохимические расчеты производились в программном комплексе Amsterdam Density Functional (ADF). В работе обсуждается эффект замещения атомов серебра на атомы меди, который выражается для случая изолированного четырехатомного МК в смещении электронных спектров поглощения в длинноволновую область спектра (рис. 1). Величина сдвига наиболее интенсивного пика составила 0,26 эВ для случая  $Ag_2Cu_2$  и обусловлена вкладом электронов высоколежащей  $d$ -полосы меди. Также рассмотрено взаимодействие изучаемых МК с точечными дефектами фосфатной матрицы. Полученные результаты сравниваются с экспериментальными данными оптической спектроскопии образцов цинкофосфатного стекла и высказывается предположение о наличии в них биметаллических МК Ag-Cu.

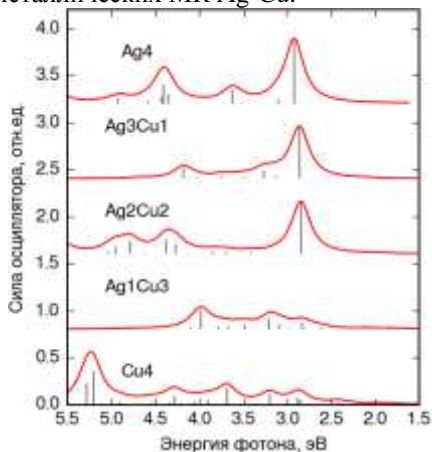


Рис. 1. Рассчитанные электронные спектры поглощения МК  $Ag_nCu_m$  ( $n + m = 4$ )

#### Список литературы

1. Dubrovin V.D., Ignatiev A.I., Nikonorov N.V., Sidorov A.I., Shakhverdov T.A., Agafonova D.S. // Optical Materials. 2014. V.36. P.753-759.
2. Diez I., Ras R.H.A. // Nanoscale. 2011. V.3. P.1963-1970.
3. Klyukin D.A., Pshenova A.S., Sidorov A.I., Stolyarchuk M.V. // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V.741. P.012125.

В.В. ГОРБЯК<sup>1</sup>, А.И. СИДОРОВ<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ»

## **МНОГОУРОВНЕВАЯ ЗАПИСЬ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В СЕРЕБРОСОДЕРЖАЩИХ СТЕКЛАХ**

Экспериментально показано, что при лазерной записи оптической информации в серебросодержащих стеклах может быть реализована запись в восьмеричном и шестнадцатеричном кодах. Считывание может производиться как по изменению интенсивности люминесценции, так и по изменению поглощения в облученных участках.

V.V. GORBYAK<sup>1</sup>, A.I. SIDOROV<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Saint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI»

## **MULTILEVEL OPTICAL OF INFORMATION RECORDING IN SILVER-CONTAINING GLASSES**

It was shown experimentally that by the laser recording of optical information in silver-containing glasses can be realized record in octal and hexadecimal codes. Reading can be done on change in the luminescence intensity either on absorbance change in the irradiated areas.

Запись и надежное хранение оптической информации важны во многих областях человеческой деятельности. Как правило, такая запись производится в двоичном коде, что отрицательно влияет на плотность записи. Использование кодов более высокого порядка позволяет существенно увеличить плотность записи информации.

Целью данной работы является изучение возможности многоуровневой лазерной записи оптической информации в серебросодержащих стеклах.

Для исследования были использованы пластины серебросодержащих силикатных стекол. Локальное облучение образцов проводилось с помощью третьей гармоники (355 нм) наносекундного YAG:Nd лазера. После облучения в облученных участках возникает люминесценция в видимой области спектра, связанная с переходом молекулярных кластеров серебра в стекле из заряженного состояния в нейтральное [1]. Показано,



что интенсивность люминесценции увеличивается с увеличением плотности энергии лазерного импульса (рис. 1). Люминесценция возбуждалась излучением с длиной волны 405 нм. При этом модуляция интенсивности люминесценции достаточна для многоуровневой записи информации в восьмеричном и шестнадцатеричном кодах. При последующей термообработке стекол при температуре выше температуры стеклования в облученных зонах формируются наночастицы серебра, обладающие плазмонным резонансом [2], и имеющие плазмонную полосу поглощения в спектральном интервале 405-410 нм. Амплитуда полосы поглощения также зависит от плотности энергии лазерного импульса (см. вставку (б) в рис. 1). Это также дает возможность записывать оптическую информацию в кодах высокого порядка.

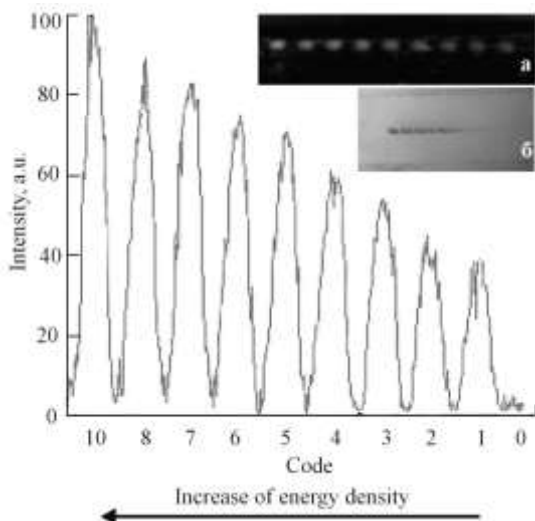


Рис. 1. Демонстрация возможности многоуровневой записи оптической информации в серебросодержащих стеклах; на вставках – фотографии облученных зон: люминесценция (а), поглощение (б)

*Список литературы*

1. Dubrovin V.D., Ignatiev A.I., Nikonov N.V., Sidorov A.I., Shakhverdov T.A., Agafonova D.S. // Optical Materials. 2014. V.36. P.753-759.
2. Климов В.В. Наноплазмоника. М.: Физматлит, 2009.

А.А. КОБРАНОВА<sup>1</sup>, А.И. СИДОРОВ<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ»

## **ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ СТЕКЛА С Eu И МОЛЕКУЛЯРНЫМИ КЛАСТЕРАМИ Ag**

Исследовано влияние температуры на оптические свойства фототерморефрактивных стекол с молекулярными кластерами серебра и европием. Проведено измерение спектров люминесценции и поглощения исходных стекол, после УФ-облучения и термообработки.

A.A. KOBRAKOVA<sup>1</sup>, A.I. SIDOROV<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Saint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI»

## **SENSITIVE ELEMENT TEMPERATURE SENSING BASED ON GLASS WITH Eu AND MOLECULAR CLUSTERS Ag**

The influence of temperature on optical properties of photo-thermo-refractive glasses with silver molecular clusters and Eu is investigated. The luminescence spectra and absorption spectra original glasses are measured before and after the UV irradiation and also after the heat treatment of the samples.

Молекулярные кластеры (МК) металлов (Ag, Au, Cu) – молекулярные структуры из нескольких атомов элемента, обладающие люминесценцией. Люминесценция МК может быть использована для преобразования излучения в люминесцентных лампах, светодиодах, солнечных элементах. Фототерморефрактивные (ФТР) стекла с Ag и Eu обладают свойствами, благодаря которым их можно использовать для создания устройств оптики и фотоники [1]. Также люминесцентные материалы могут быть использованы для создания волоконных датчиков температуры [2].

Цель работы – исследование влияния ионов европия и молекулярных кластеров серебра, а также непрерывного УФ-облучения и термообработки на люминесценцию в серебросодержащих стеклах, в том числе влияние температуры на обратимые оптические свойства стекол с серебром и европием.

Для проведения исследований использовались ФТР-стекла с серебром и европием (AgEu) [3]. Особенность исследуемых образцов – высокая для силикатных стекол концентрация ионов серебра и европия.

Исходно стекла AgEu были бесцветны и обладали относительно слабой люминесценцией в красной области спектра с характерными для ионов  $\text{Eu}^{3+}$  основными максимумами на длинах волн 590, 615 нм (рис. 1, кривая 1). Облучение непрерывным УФ-излучением ртутной лампы в течение 10 мин и последующая ТО при  $T = 400^\circ\text{C}$  приводят к появлению широкой полосы люминесценции, максимумы которой приходится на 520 нм и 540 нм (кривые 2 и 3 на рис. 1). Данная полоса люминесценции вызвана МК серебра, которые изначально присутствуют в стекле. Вклад в данную полосу люминесценции вносят, в основном, нейтральные МК серебра  $\text{Ag}_2$ ,  $\text{Ag}_3$  и  $\text{Ag}_4$ , а также атомы  $\text{Ag}_0$ .

Проведено исследование влияния температуры на люминесценцию МК для различных температур. Показано, что при увеличении температуры происходит обратимое тушение люминесценции, что характерно для большинства люминесцентных материалов. Данный эффект может быть использован при разработке люминесцентных датчиков температуры.

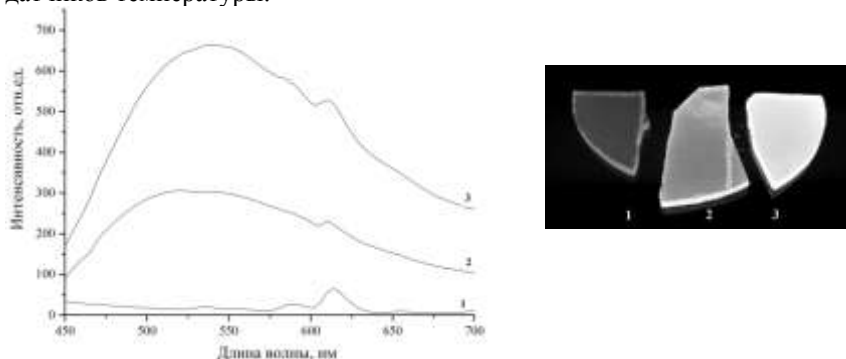


Рис. 1. Спектры люминесценции стекла AgEu на различных стадиях обработки: 1 – до УФ-облучения; 2 – УФ-облучение 10 мин; 3 – УФ и термообработка ( $400^\circ\text{C}$ , 2 ч), длина волны возбуждения 405 нм; на вставке фотографии люминесценции образцов

#### Список литературы

1. Dubrovina V.D., Ignatiev A.I., Nikonov N.V., Sidorov A.I., Shakhverdov T.A., Agafonova D.S. // *Optical Materials*. 2014. V.36. P.753-759.
2. Allison S.W., Gillies G.T. // *Rev. Sci. Instrum.* 1997. 68 (7). P.2615-2650.
3. Никоноров Н. В., Панышев Е.И., Туниманова И.В., Чухарев А.В. // *Физика и химия стекла*. 2001. Т.27. №36. С.241-249.

А.В. ЦИБУЛЬНИКОВА<sup>1,2</sup>, Н.А. МЫСЛИЦКАЯ<sup>1,2</sup>,  
В.А. СЛЕЖКИН<sup>1,2</sup>, В.В. БРЮХАНОВ<sup>1</sup>, Е.С. ЗЕМЛЯКОВА<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград  
<sup>2</sup>Калининградский государственный технический университет

## **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМОНОВ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА РАЗЛИЧНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ С МОЛЕКУЛАМИ СЫВОРОТОЧНОГО АЛЬБУМИНА**

В работе исследовано влияние наночастиц серебра различной морфологии и размеров на флуоресцентные характеристики молекул сывороточного альбумина.

A. V. TCIBULNIKOVA<sup>1,2</sup>, N. A. MYSLITSKAYA<sup>1,2</sup>,  
V. A. SLEZHKIN<sup>1,2</sup>, V. V. BRYUKHANOV<sup>1</sup>, E. S. ZEMLYAKOVA<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Immanuel Kant Baltic Federal State University, Kaliningrad  
<sup>2</sup>Kaliningrad State Technical University

## **INTERACTION BETWEEN PLASMON OF SILVER NANOPARTICLES OF DIFFERENT ORIGIN AND BOVINE SERUM ALBUMIN MOLECULES**

The effect of silver nanoparticles with different morphology and size on the fluorescence properties of bovine serum albumin molecules was investigated.

Наночастицы (НЧ) металлов способны как усиливать флуоресценцию флуорофоров, за счет переноса энергии плазмонов [1], так и тушить ее [2, 3]. В работе были использованы НЧ серебра, полученные методом химического восстановления соли серебра из исходного раствора и НЧ, полученные методом лазерной абляции серебряной пластины в воде. Радиус НЧ был определен методом фотонно-корреляционной спектроскопии на установке PhotoCor-Complex. Спектры флуоресценции молекул альбумина измеряли на установке Fluorolog-3 фирмы Horiba and Jobin Yvon (Франция). Максимум флуоресценции альбумина расположен на длине волны  $\lambda=340$  нм, в присутствии НЧ серебра не смещался.

В первой серии экспериментов было исследовано влияние НЧ серебра цитратного гидрозоль на флуоресценцию молекул альбумина ( $C = 0,5$  мМ) в водном растворе. Концентрация НЧ серебра варьировалась, а средний радиус НЧ серебра составлял  $R=20$  нм. Получено плазмонное усиление флуоресценции молекул альбумина в присутствии НЧ серебра.

Установлено, что НЧ серебра усиливают интенсивность флуоресценции при малых концентрациях, причем наибольшее увеличение – 33 % – приходится на концентрацию –  $2,5 \cdot 10^{-9}$  моль/л.

Во второй серии экспериментов было исследовано влияние абляционных НЧ Ag с радиусом 27 нм на флуоресценцию молекул альбумина. Концентрации молекул альбумина и НЧ серебра были подобраны согласно эксперименту в 1-й серии. Механизм взаимодействия абляционных НЧ серебра с молекулами альбумина носит характер тушения по закону Штерна-Фольмера. Константа Штерна-Фольмера оказалась равной  $k_{SV} = 2,6 \cdot 10^9$  л/моль.

Таким образом, в случае с НЧ серебра цитратного гидрозоля менее выражены особенности тушения, а при низких концентрациях НЧ серебра наблюдается даже усиление флуоресценции, в то время как в случае с абляционными НЧ наблюдается только тушение. По-видимому, это связано с дистанционной зависимостью флуоресцирующего центра и наночастицы. НЧ, полученные химическим методом, имеют цитратную оболочку, поэтому среднее расстояние между НЧ и молекулой альбумина увеличивается и плазмонный резонанс преобладает над эффектом металлического тушения.

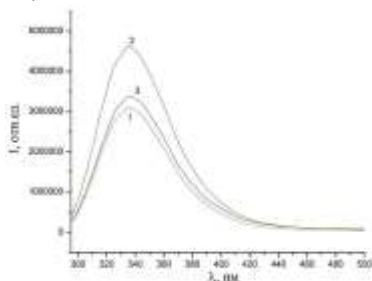


Рис. 1. Спектры флуоресценции альбумина в отсутствие (кривая 1) |и в присутствии НЧ серебра цитратного гидрозоля (2 – концентрация серебра  $2,5 \cdot 10^{-9}$  моль/л, 3 –  $7,5 \cdot 10^{-9}$  моль/л)

Результаты получены в рамках государственного задания Минобрнауки России №3.809.2014/К.

#### Список литературы

1. Климов В.В. Наноплазмоника. М.: Физматлит, 2009.
2. Агранович В.М., Галанин М.Д. Перенос энергии электронного возбуждения в конденсированных средах. М.: Наука, 1978.
3. Тихомирова Н.С., Мыслицкая Н.А., Самусев И.Г., Брюханов В.В. Плазмонное усиление переноса электронной энергии между квантовыми точками на поверхности нанопористого кремнезема // ЖПС. Т.82. №6. 2015. С.885-893.

Л.И. ФАТХУТДИНОВА, Э.К. НЕПОМНЯЩАЯ,  
Е.Н. ВЕЛИЧКО, Е.Т. АКСЕНОВ

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ МЕТОДОМ ПОЛЯРИМЕТРИИ**

В работе рассматриваются особенности и физические принципы реализации метода отражательной поляризационной поляриметрии для исследования магнитных жидкостей. Получены распределения интенсивностей обратно рассеянного поляризованного света в зависимости от концентрации суспензии магнетита ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) в керосине. Показано, что поляриметрия обратно рассеянного света является перспективным направлением исследования мутных сред, которое может найти применение для широкого спектра промышленных и научных задач.

L.I. FATKHUTDINOVA, E.K. NEPOMNYASCHAYA,  
E.N. VELICHKO, E.T. AKSENOV

*Peter the Great Saint-Petersburg polytechnic university*

## **STUDY OF MAGNETIC FLUIDS BY THE METHOD OF POLARIMETRY**

In the report the features and physical principles of the method of reflective polarization polarimetry for magnetic fluids investigation is considered. Intensity distributions of backscattered polarized light depending on the concentration of slurry of magnetite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) in kerosene are obtained. It is shown that polarimetry of backscattered light is a promising method for investigation of turbid media. The method may be used for a wide range of industrial and scientific problems.

Использование методов лазерного светорассеяния и регистрации параметров обратно рассеянных световых полей является перспективным направлением по созданию высокоэффективной измерительной аппаратуры для исследования и измерения оптико-физических параметров магнитных жидкостей [1]. Поляризованный свет, многократно рассеянный в мутной среде, содержит информацию о внутреннем строении, форме и размерах рассеивателей.

В ходе данной работы, основываясь на результатах публикации [2], была разработана и собрана экспериментальная установка, позволяющая изучать поляризационные характеристики обратно рассеянного света сильно поглощающими объектами. Линейно поляризованный свет от

полупроводникового лазерного модуля KLM-G650-13-5 проходил через полупрозрачную пластину и подавался на кювету, наполненную магнитной жидкостью. Рассеянное излучение при помощи полупрозрачной пластины направлялось на выходной анализатор и регистрировалось ПЗС-камерой, сигнал которой поступал на цифровой осциллограф Tetronix TBS1062 с функцией выборки строки.

В результате измерений суспензии магнетита ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) в керосине – магнитной жидкости – на осциллографе наблюдалось светлое пятно с интенсивным свечением в центре и некоторой осевой симметрией вокруг центрального распределения, связанной со структурой объекта. На данном этапе работы анализировалась центральная область пятна с максимальной интенсивностью свечения (чему соответствовала 64-я строка изображения). Пример получаемого сигнала представлен на рис. 1.

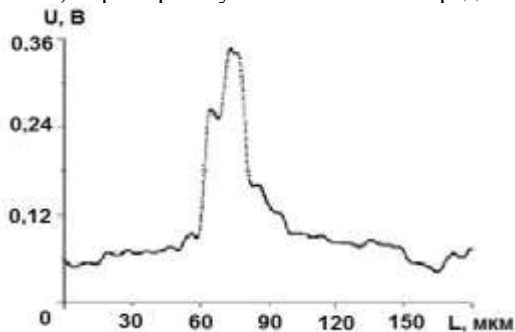


Рис. 1. Пример распределения интенсивности сигнала на 64-й строке изображения

Полученные результаты показали, что с уменьшением концентрации магнитной жидкости полуширина распределений по уровню половинной интенсивности увеличивается, что связано с ожидаемым увеличением проникновения зондирующего света вглубь жидкости. Поляриметрия обратного рассеянного света является перспективным направлением исследования мутных сред, которое может найти применение для широкого спектра промышленных и научных задач.

#### *Список литературы*

1. Nepomniashchaia E.K., Prokofiev A.V., Aksenov E.T., Pleshakov I.V., Bibik E.E., Velichko E.N., Kuzmin Yu.I. Laser correlation spectroscopy and nonlinear magneto-optic response of structures formed by nanoparticles in magnetic fluid // Proceedings of 2016 International Conference Laser Optics. St. Petersburg, 2016. R9-9.
2. Dogaru M., Asakura T. Photon pathlength distribution from polarized backscattering in random media // J. Optical Engineers. 1996. V.35. No 8. P.2234-2239.

Е.А. САВЧЕНКО, Э.К. НЕПОМНЯЩАЯ, Д.Б. ДЮБО,  
Е.Н. ВЕЛИЧКО, О.Ю. ЦЫБИН

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

## **НОВАЯ СХЕМА РЕГИСТРАЦИИ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ В БИОМОЛЕКУЛЯРНЫХ ЖИДКОСТЯХ**

В работе рассматриваются вопросы изучения флуоресценции различных биомолекул с использованием нового сверхточного регистрирующего pin-диода. В качестве исследуемых объектов использовались водные растворы альбумина, L-аланина, казеина и люциферазы. Представлены полученные экспериментальные данные и обсуждаются возможные области применения полученных результатов.

E.A. SAVCHENKO, E.K. NEPOMNYASHCHAYA, D.B. DUBO,  
E.N. VELICHKO, O.Yu. TSYBIN

*Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University*

## **NEW METHOD OF REGISTRATION OF FLUORESCENCE IN BIOMOLECULAR LIQUIDS**

Investigation of fluorescence of biomolecules with a new ultra-precise recording device – pin diode are considered. Water solutions of albumin, casein, L-alanine, and luciferase were investigated. First experimental results and possible applications are discussed.

В настоящее время для изучения структуры биомолекул, в частности белковых комплексов, активно применяют различные флуоресцентные методы. Например, интенсивность флуоресценции триптофанового остатка широко используется как инструмент для мониторинга конформационных изменений в белках, позволяющий делать выводы относительно их локальной структуры и ее динамики [1]. Известно, что флуоресценция возникает после поглощения света и связана с электронным переходом молекулы из возбужденного состояния в основное. Интенсивность и максимальная длина волны флуоресценции, спектральные сдвиги, анизотропия могут использоваться для характеристики конформационных изменений белка [1].

Для регистрации спектров флуоресценции в люминометрах обычно используют ФЭУ. Но недавно появились опытные образцы нового прибора на основе pin-диода [2] с встроенным затвором, работающего в динамическом режиме. Добавление области собственного полупроводника



к рп-переходу имеет два преимущества. При увеличении обедненной области, барьерная емкость уменьшается, что приводит к более быстрой работе детектора. Увеличение области обеднения также улучшает квантовую эффективность за счет увеличения количества «полезных» носителей, генерируемых в области высокого поля.

В данной работе предложена новая схема регистрации интенсивности флуоресценции биомолекул. Свет от лазерного источника импульсно подавался на кювету с образцом. Интенсивность свечения биомолекул после выключения лазера регистрировалась при помощи рп-диода, расположенного непосредственно под образцом (рис. 1).

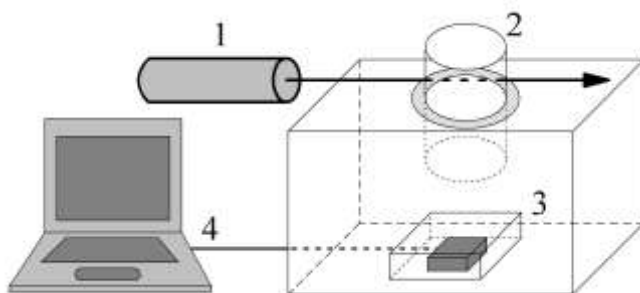


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – лазер, 2 – кювета с образцом, 3 – рп-диод, 4 – компьютер

Время переключения диода соответствует времени рассасывания объемного заряда, накопленного под затвором, и является функцией от мощности поглощенного света [2]. Применение рп-диода в качестве регистрирующего прибора существенно повышает точность проводимых исследований, так как данный прибор более чувствителен по сравнению с имеющимися методами регистрации флуоресценции.

Первые экспериментальные результаты по изучению флуоресценции биомолекул позволяют сделать вывод о перспективности применения данного рп-диода в системах регистрации слабых излучений молекулярных структур, однако его характеристики требуют дальнейшего изучения.

#### Список литературы

1. Сутормин О.С., Суковатая И.Е., Кратасюк В.А. // Известия иркутского государственного университета. 2014. Т.7. С.20-26.
2. Okhonin S., Gureev M., Salin D., Appel J., Kvasov A. Pastre M., Polzik E.S., Tagantsev A.K., Uddegard F., Kayal M. // Applied Physics Letters. 2015. V.06. P.3111.

Т.Б. КУЗЬМИНА, Н.В. АНДРЕЕВА, О.В. АНДРЕЕВА  
*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ БИОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО РАССЕЯНИЯ**

Представлены результаты исследования препаратов крови здоровых и подопытных лабораторных мышей, проведенные методом динамического рассеяния света. Показано, что при определенных режимах подготовки препаратов параметры функции распределения частиц по размерам здоровых особей и особей с привитой карциномой Эрлиха имеют ярко выраженное различие.

T.B. KUZMINA, N.V. ANDREEVA, O.V. ANDREEVA  
*ITMO University, Saint-Petersburg*

## **ANALYSIS OF THE PARAMETERS OF BIOLOGICAL FLUIDS BY DYNAMIC LIGHT SCATIRING METHOD**

The paper presents the results of the analysis of normal and test laboratory mice's blood products, conducted by dynamic light scattering method. It is shown that in certain modes of the preparation of products, the particles size parameters in the distribution function of normal objects and in the objects with graft Ehrlich carcinoma have a pronounced difference.

В настоящее время большое внимание уделяется разработке методов ранней диагностики онкологических заболеваний. Существующие методики, базирующиеся на общих анализах крови, составляют достаточно объёмную комплексную программу, но по отдельности каждая такая методика является вспомогательной [1]. В то же время, самые эффективные методы, такие как рентгенография, компьютерная и магнитно-резонансная томография, связаны с риском для здоровья пациента [2]. Поиск новых методов диагностики, основанных на использовании разработанной и освоенной аппаратуры, является актуальной и важной для практической медицины задачей. Метод динамического рассеяния света пока не нашел применения в качестве метода биомедицинской диагностики, хотя реализован в ряде приборов, доступных для широкого применения и использования в лабораторной практике. Представляемые поисковые исследования проведены при использовании прибора Horiba LB-550 совместно со специалистами центра сердца, крови и эндокринологии им. В.А. Алмазова [3]. Основной

параметр характеристики объектов при использовании метода динамического рассеяния - функция распределения частиц по размерам, на основании измерения которой определялся характерный диаметр частиц (т.е. диаметр частиц с наибольшей концентрацией) в каждом исследованном препарате.

Объектами исследования являлись препараты цельной крови и препараты плазмы крови, полученные в ходе забора венозной крови у лабораторных мышей двух групп: контрольной и опытной группы с привитой асцитной карциномой Эрлиха.

При исследовании препаратов цельной крови не удалось выявить характерных различий между двумя группами особей. По-видимому, это связано с большим разнообразием форм и размеров содержащихся в крови компонентов [4]. При анализе экспериментальных данных по исследованию препаратов плазмы крови было отмечено, что в препаратах плазмы, полученных в «мягком» режиме центрифугирования (5 минут, 1500 об/мин) и разбавленных физиологическим раствором до концентрации (1-3)%, наблюдается различие характерного диаметра частиц по группам здоровых и опытных особей. При сравнении результатов более десяти экспериментальных серий было показано, что разница между средним значением характерного диаметра частиц в препаратах плазмы крови всех исследованных особей с карциномой Эрлиха (опытная группа) и всех исследованных здоровых особей (контрольная группа) в несколько раз превышает погрешность проводимых измерений. На более «жестком» режиме центрифугирования (например, 10 минут, 3000 об/мин) погрешность определения среднего характерного диаметра частиц в препаратах плазмы крови в каждой группе особей увеличивается в несколько раз и оцениваемая разница становится сравнимой с погрешностью проводимых измерений.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования метода динамического рассеяния для диагностики патологического состояния организма, связанного с наличием онкологического заболевания.

#### *Список литературы*

1. Михнин А.Е. // Практическая онкология. 2007. Т.8 (1). С.17.
2. Herzog P., Rieger C. T. // The lancet. 2004. V.363 (9427). P.2192-2193.
3. Белявцев А.Ю., Чигрин Р.Н., Панченко А.В., Андреева Н.В., Тындык М.Л., Андреева О.В. // V международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2016. С.446-447
4. Липунова Е.А., Скорокина М.Ю. Физиология крови. Белгород: Изд-во «БелГУ», 2007. С.19-21.

С.И. КИРЮШИНА, А.В. МЯГОТИН

*Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск***НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА  
НАНОЖИДКОСТЕЙ**

В данной работе проведен теоретический анализ светоиндуцированного линзового отклика в дисперсной жидкофазной среде в поле гауссова пучка.

S.I. KIRJUSHINA, A.V. MJAGOTIN

*Far Eastern State Transport University, Khabarovsk***NONLINEAR OPTICAL DIAGNOSTICS OF NANOLIQUIDES**

In this paper the theoretical analysis of the light-induced mass transfer in the dispersed liquid medium in the Gaussian beam field was carried out.

Нелинейно-оптическая диагностика наноматериалов основана на различных механизмах светоиндуцированной модуляции оптических констант среды [1-3]. Одним из классических методов является исследование термолинзового отклика среды, обусловленного наличием поглощения [4-6].

Целью данной работы является теоретический анализ светолинзового отклика в прозрачной дисперсной среде в однолучевой схеме.

Рассмотрим жидкофазную среду с наночастицами (дисперсная фаза), находящуюся под воздействием лазерного излучения с гауссовым профилем интенсивности. Для гауссова пучка распределение интенсивности падающего излучения в плоскости, перпендикулярной оптической оси  $z$ :

$$I = I_0 \left( 1 + \left( \lambda z / (\pi r_0^2) \right)^2 \right)^{-1} \exp(-r^2(z) / r_1^2(z)), \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны излучения,  $I_0$  – интенсивность излучения на оси в плоскости перетяжки пучка,  $r$  – расстояние от оси пучка,  $r_0$  – радиус пучка в перетяжке,  $r_1(z) = r_0 \sqrt{1 + \left( \lambda z / (\pi r_0^2) \right)^2}$  – радиус пучка на расстоянии  $z$  от перетяжки.

Балансное уравнение, описывающее динамику концентрации наночастиц в жидкофазной среде с учётом диффузионного и электрострикционного потоков ( $J_{el} = \gamma CVI$  – электрострикционный поток), можно записать в виде [7]:

$$\partial C / \partial t = D \nabla^2 C - \text{div}(\gamma CVI). \quad (2)$$

Здесь приняты следующие обозначения:  $C(r, t)$  – объемная концентрация дисперсных частиц,  $D$  – коэффициент диффузии,  $\gamma = b\mu$ ,  $b = 4\pi\beta D / (c_0 n k T)$ ,  $\mu = (6\pi\eta a)^{-1}$  – подвижность наночастицы,  $a$  – радиус наночастицы,  $\eta$  – вязкость жидкости,  $\beta$  – поляризуемость частицы,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура среды,  $c_0$  – скорость света в вакууме,  $n$  – эффективный показатель преломления среды. Для расчета светового сигнала используем выражение для линзовой прозрачности кюветы [6]:

$$T = 1 + 2(z_1/l_0) F_{nl}(0) \left[ (1 + z_1^2/l_0^2) (1 + 3z_1^2/l_0^2) \right]^{-1}, \quad (3)$$

где  $F_{nl}(0)$  – нелинейный набег фаз в оптической ячейке на оси пучка. Используя (4)-(5), для значения нелинейного набег фазы имеем:

$$F_{nl}(0) = 0, 25n_1 d D^{-1} \Phi_0 \delta^2 r_0^2 \left( 1 - r_0^2 \left[ r_0^2 + 4Dt \right]^{-1} \right), \quad (4)$$

где  $d$  – толщина слоя жидкости. Полученное выражение с учетом (3) описывает световый отклик (интенсивность излучения на оси пучка в плоскости фотоприемника).

#### Список литературы

1. Иванов В.И., Иванова Г.Д., Хе В.К. // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2011. №4. С.39-44.
2. Гришко В.И., Гришко В.П. и др. Новосибирск: ИНХ СО РАН, 1992.
3. Иванов В.И., Кузин А.А., Ливашвили А.И., Хе В.К. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2011. Т.4. №134. С.44-46.
4. Ливашвили А.И., Иванова Г.Д., Хе В.К. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов: межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. Тверь: Твер. гос. ун-т, 2014. Вып.6. С.227-230.
5. Иванов В.И., Ливашвили А.И., Окишев К.Н. // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия «Физика». 2009. Т.4. №2. С.58-60.
6. Иванов В.И., Карпец Ю.М., Ливашвили А.И., Окишев К.Н. // Известия Томского политехнического университета. 2005. Т.308. №5. С.23-24.
7. Иванов В.И., Ливашвили А.И. // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т.22. №8. С.751-752.

А.И. ЛИВАШВИЛИ, В.В. КРИШТОП, Г.В. КОСТИНА,  
Т.Б. ЛИХОВОДОВА

*Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск*

## **ДИНАМИКА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НАНОЖИДКОСТИ, НАХОДЯЩЕЙСЯ В СВЕТОВОМ ПОЛЕ**

Теоретически изучается динамика коэффициента теплопроводности наножидкости в случае её зависимости от концентрации наночастиц. Показано, что в условиях стационарной температуры для коэффициента теплопроводности имеет место оптическое насыщение.

A.I. LIVASHVILI, V.V. KRISHTOP, G.V. KOSTINA,  
T.B. LIKHOVODOVA

*Far Eastern State Transport University. Khabarovsk*

## **THE DYNAMICS OF THE THERMAL CONDUCTIVITY OF NANOLIQUID IN A LIGHT FIELD**

In theory, we study the dynamics of thermal conductivity of nanofluids in the case of its dependence on the concentration of the nanoparticles. It is shown that in the conditions of a fixed temperature for the thermal conductivity of the optical saturation occurs.

Рассматривается жидкофазная среда с наночастицами, облучаемая световым пучком с гауссовым профилем интенсивности. В результате воздействия светового поля в среде возникают градиенты температуры и концентрации, обуславливающие процессы теплопереноса. Эти явления описываются системой балансных уравнений для температуры и частиц [1]:

$$C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda(C) \nabla_x^2 T + \alpha_0 \tilde{I}_0 \exp\left(-\frac{x^2}{x_0^2}\right), \quad \frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla_x^2 C + D_T \nabla_x [C(1-C) \nabla_x T].$$

В уравнении теплопроводности опущено слагаемое, ввиду его малости, отвечающее за эффект Дюфура. Здесь приняты следующие обозначения:  $T$  – температура среды,  $C = C(r, t) = m_0/m$  – массовая концентрация частиц ( $m_0$  – масса частиц,  $m$  – масса всей среды),  $C_p$ ,  $\rho$ , -

теплофизические постоянные жидкости,  $\lambda(C)$  - коэффициент теплопроводности,  $\tilde{I}_0$  - интенсивность света,  $a_0$  - коэффициент поглощения среды;  $D, D_T$  - коэффициенты диффузии и термодиффузии соответственно. Рассматривается одномерный случай и исключается вклад от конвективного слагаемого, которое возникает в уравнении диффузии. Учитывается тот факт, что процессы установления температуры идут быстрее диффузионных. Это дает возможность изучать последние на фоне стационарной температуры:  $\partial T/\partial t = 0$ .

Рассматривая случай малых концентраций и линеаризуя уравнение диффузии с учётом зависимости [2]:

$$\lambda(C) = \lambda_0 + \beta C = \lambda_0(1 + pC),$$

получим задачу:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = b \nabla_x^2 C - (1 - pC_0) \exp\left(-\frac{x^2}{x_0^2}\right) C. \quad C(x, 0) = \exp\left(-\frac{x^2}{x_0^2}\right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial C(0, t)}{\partial x} = 0 \quad (0 \leq x < \infty), \quad (2)$$

где:  $b = \frac{\lambda_0}{S_T \alpha_0 I_0}$ ,  $\tau = \frac{D_T}{\lambda_0} \alpha_0 I_0 t$ .

Задача (1) - (2) решалась методами теории возмущений, где в качестве малого параметра принималась величина:  $1 - pC_0$ . Из соображений громоздкости полученных приближений, ограничимся их асимптотикой:

$$\lambda(x, \tau) \approx \left(1 + p \cdot \exp\left(-x^2 x_0^{-2} \frac{1}{1 + 4b\tau}\right) \frac{1}{\sqrt{1 + 4b\tau}} C_0\right). \quad (3)$$

Анализ выражения (3) показывает:

1) на динамику коэффициента теплопроводности амплитудное значение интенсивности света влияния не оказывает.

2) с течением времени влияние концентрации уменьшается.

#### Список литературы

1. Де Гроот, Мазур П. Неравновесная термодинамика. М.: Мир, 1964.
2. Putnam S.A. // Journal of Applied Physics. 2006. 99. 084308.

Б.Б. АВЕРБУХ, И.Б. АВЕРБУХ

*Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск*

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛОСКОЙ S-ПОЛЯРИЗОВАННОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ НАНОСТЕРЖНЕ И НАНОТРУБКЕ

Наностержень или нанотрубка состоят из плоскопараллельных монослоев точечных электрических диполей. Рассчитаны поля внутри наностержня и нанотрубки. Показана возможность усиления излучения, а также получения близкого к единице показателя преломления.

B.B. AVERBUKH, I.B. AVERBUKH

*Pacific State University, Khabarovsk*

## PROPAGATION OF PLANE S- POLARIZED ELECTROMAGNETIC WAVES IN A CYLINDRICAL NANOROD AND NANOTUBE

Nanorod or nanotube consists of plane-parallel monolayers composed of point electric dipoles. Calculated field within the nanorod and nanotube. The possibility of radiation amplification and also receiving index of refraction, close to unity, is shown.

В данной работе, являющейся продолжением работы [1], рассматривается распространение плоской монохроматической  $s$ -поляризованной волны  $\mathbf{E}_0 = E_0 \mathbf{e}_0 \exp(i\omega t - i\mathbf{k}_0 \mathbf{r})$  с частотой  $\omega$ , волновым вектором  $\mathbf{k}_0 = (0, k_{0y}, k_{0z})$  и вектором поляризации  $\mathbf{e}_0$  в наностержне и нанотрунке и отражение от них с точки зрения молекулярной оптики. Наностержень (или нанотрубка) представляется цилиндром с радиусом основания  $R$  (или цилиндрической трубкой с радиусами основания  $R_1 < R_2$ ), состоящим из плоскопараллельных монослоев электрических диполей, характеризующихся поляризуемостью  $A = A' - iA''$ . Поля диполей учитываются полностью. Все дипольные монослои лежат в плоскостях  $xy$ , пересекающих ось цилиндра  $z$  в точках  $z_1, z_2, z_3, \dots$ . Расстояния между всеми монослоями по оси  $z$  равны  $a$ , причем  $a \ll \lambda$ , где  $\lambda$  - длина волны излучения. Диполи одного монослоя расположены неупорядоченно (с плотностью  $N$ ) и не взаимодействуют между собой.



Предполагается, что размеры диполей много меньше расстояний между диполями, а также величин  $a$  и  $\lambda$ , где  $\lambda$  - длина волны излучения.

Поле в точках нахождения диполей  $n$ -го монослоя в случае наностержня  $\mathbf{E}(x_n, y_n, z_n) = D_s(1 - iPq)^{n-1} E_0 \mathbf{e}_0 \exp(i\omega t - ik_{0y}y_n - ik_{0z}z_n)$ ,

где  $P = 2\pi N A k^2 / k_{0z} = P' - iP''$ ,  $q = 1 - \exp[-ik_{0z}(b-a)]$ ,  $b^2 \approx a^2 + 4R^2$ .

При  $|k_{0z}a| \ll 1$  имеем  $D_s = 2k_{0z} / (k_{0z} + k_{2z})$ . Здесь  $k_{2z} = k_{2z}' + ik_{2z}''$

-  $z$  компонента волнового вектора преломленной волны. Если

$k_{0z}(b-a) \ll 1$ , и  $|P| \ll 1$ , то  $q \approx ik_{0z}(b-a)$  и  $(1 - iPq)^{n-1} \approx \exp[-iPq(n-1)]$ .

Значит  $-iPq \approx Pk_{0z}(b-a) = (P' - iP'')k_{0z}(b-a) = P'k_{0z}(b-a) - iP''k_{0z}(b-a)$ .

При этом в точке нахождения диполя  $n$ -го монослоя распространяющееся вперед поле

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(x_n, y_n, z_n) &= \\ &= i\omega E_0 \mathbf{e}_0 \exp[i\omega t - ik_{0y}y_n - ik_{0z}z_n + P_d' k_{0z}(b-a)(n-1) - iP_d'' k_{0z}(b-a)(n-1)]. \end{aligned}$$

Видно, что вещественная часть  $P_d'$  определяет усиление (т.к. при малых  $R$  и  $a$  разность фаз полей излучения различных диполей очень мала), а мнимая – преломление. Учитывая, что  $z_n = z_1 + a(n-1)$ , получаем

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(x_n, y_n, z_n) &= \\ &= E_0 \mathbf{e}_0 \exp[i\omega t - ik_{0y}y_n - ik_{0z}z_1 + P_d' k_{0z}(b-a)(n-1) - ik_{2z}' a(n-1)]. \end{aligned}$$

где  $k_{2z}' = k_{0z}[1 + P_d''(b-a)/a]$ . В отсутствии поглощения ( $P_d'' = 0$ ) отсутствует и преломление.

Таким образом, наностержень из прозрачного материала может вести себя как среда с близким к единице показателем преломления. Кроме того, вследствие малых размеров наностержня составляющие его диполи переизлучают так, как будто находятся в пределах одной зоны Френеля, чем и определяется возможность усиления.

Распространение излучения в нанотрубке рассматривается аналогично за исключением того, что величина  $q$  теперь заменяется на

$$q_1 = \exp[-ik_{0z}(b_1 - a)] - \exp[-ik_{0z}(b_2 - a)] \text{ с } b_1^2 \approx a^2 + 4R_1^2 \text{ и } b_2^2 \approx a^2 + 4R_2^2.$$

#### Список литературы

1. Авербух Б.Б., Авербух И.Б. Формирование отраженной и преломленной s-поляризованных электромагнитных волн в задаче Френеля с точки зрения молекулярной оптики. // Изв. вузов. Физика. 2015. Т.58. №12, С.83-88.

П.Ф. КАРЦЕВ, И.О. КУЗНЕЦОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## УЧЕТ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ФОНОНАМИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ТЕРМАЛИЗАЦИИ БОЗЕ-ГАЗА ПОЛЯРИТОНОВ

Исследуется влияние взаимодействия экситонов с фононами на процесс термализации бозе-газа в контексте задачи о достижении бозе-конденсации поляритонов под действием оптической накачки. Используется численное решение кинетических уравнений.

P.F. KARTSEV, I.O. KUZNETSOV

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

## TAKING INTO ACCOUNT THE POLARITON-PHONON INTERACTION FOR THE SIMULATION OF THE BOSE GAS THERMALIZATION PROCESS

We investigate the effect of the exciton-phonon interaction on the Bose gas thermalization process, in the context of problem of obtaining Bose-Einstein condensate in the system of polaritons under optical pumping. The kinetic equations are solved numerically.

Описание процесса термализации взаимодействующего бозе-газа является сложной физической задачей. Интерес к этому явлению связан с возможностями эксперимента по достижению бозе-конденсации при температурах, близких к комнатной, в системе поляритонов в полупроводниковом образце при оптической накачке [1, 2], что может привести к созданию новых оптоэлектронных приборов и оптических преобразователей. Стоит задача определения оптимальных условий эксперимента, при которых скорость формирования бозе-конденсата будет превышать скорость распада поляритонов и других потерь.

В работе [3] нами были представлены данные по исследованию термализации бозе-газа за счет двухчастичного взаимодействия:

$$\hat{V} = U_0 \sum_{\substack{k,l,p,q: \\ k+l=p+q}} a_k^+ a_l^+ a_p a_q$$

Было использовано «золотое правило Ферми», дающее систему кинетических уравнений для чисел заполнения  $n_k(t)$ :

$$\frac{dn_k}{dt} = \frac{1}{h} U_0^2 \sum_{\substack{lpq \\ k+l=p+q}} [(n_k + 1)(n_l + 1 + \delta_{kl})n_p(n_q - \delta_{pq}) - n_k(n_k - \delta_{kl})(n_p + 1)(n_q + 1 + \delta_{pq})]$$

Область применимости данной системы ограничена достаточно высокой температурой (нет бозе-конденсата и корреляции между числами заполнения пренебрежимо малы), таким образом, она может применяться для исследования первых стадий релаксации и охлаждения системы после лазерной накачки. Данная система уравнений решалась численно и показала возможность моделирования процесса термализации с помощью «золотого правила Ферми».

Отметим, впрочем, что взаимодействие между частицами может дать только релаксацию к температурному равновесию, но для охлаждения требуется учесть обмен энергией с термостатом, т.е. взаимодействие с фононной подсистемой.

В данной работе представлено исследование бозе-системы с учетом взаимодействия с фононами, взятого в виде:

$$\hat{V}_{exc-ph} = M_0 \sum_{kl} \alpha_k^+ \alpha_l (b_{l-k}^+ + b_{k-l})$$

В докладе даны результаты моделирования релаксации и охлаждения системы при различных параметрах взаимодействия и внешней накачки, для дискретных систем размерами  $8^3$ ,  $16^3$ ,  $32^3$ . Демонстрируется влияние параметров задачи на характерные времена процессов. Обсуждается возможность расчёта параметров реалистичных систем. Обсуждается исследование равновесного состояния системы при низкой температуре с помощью моделирования методом квантового Монте-Карло.

Работа поддержана грантом РФФИ № 15-02-02764.

*Список литературы*

1. Lambert K., van Vugt, et al. // PNAS. 2011. V.108. No 2. P.10050-10055.
2. Rahimi-iman A., et al. // Phys. Rev. B. 2012. V.86. 153308.
3. Kartsev P.F., Kuznetsov I.O. // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V.737. 012033.

А.Б. БЫЧКОВ, А.С. КОЖИНА, А.А. МИТЮРЕВА,  
В.В. СМИРНОВ

*Санкт-Петербургский государственный университет*

## **МОДИФИКАЦИЯ ТРАЕКТОРНОГО МЕТОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ МНОГОФОТОННОЙ ИОНИЗАЦИИ**

Продемонстрировано, что модификация разработанного нами ранее траекторного метода оценки вероятности фотоионизации, позволяет существенно улучшить результат на частотах излучения, ниже порога ионизации в многофотонном режиме. В качестве примера рассмотрен процесс фотоионизации атома водорода.

A.B. BICHKOV, A.S. KOZHINA, A.A. MITYUREVA,  
V.V. SMIRNOV

*Saint-Petersburg State University*

## **MODIFICATION OF THE TRAJECTORY METHOD FOR EVALUATION THE PROBABILITY OF MULTIPHOTON IONIZATION**

It has been demonstrated that modification of the developed earlier trajectory method of evaluation the probability of photoionization, can significantly improve the results at radiation frequencies below the ionization threshold in multiphoton mode. As an example it was considered the process of photoionization of the hydrogen atom.

Траекторные методы успешно применяются для описания процесса фотоионизации в сильном лазерном поле и, в частности, - многофотонной ионизации. Однако для слабого поля без специальных поправок они могут приводить к неправильной зависимости вероятности многофотонной ионизации от интенсивности излучения, если энергия фотона меньше порога ионизации. Мы предложили процедуру, которая позволяет преодолеть этот недостаток [1]. Процедура использовалась для модификации ранее разработанного нами траекторного метода [2-5]. Модифицированный метод устраняет указанную проблему. Он работает в широком диапазоне величин поля, в том числе для суператомных полей. В качестве простого примера его применения мы рассчитали вероятность фотоионизации атома водорода.

Результаты расчетов представлены на рис. 1 и 2. Все величины приводятся в атомной системе единиц.

Рис. 1 представляет рассчитанную зависимость вероятности фотоионизации атома водорода от интенсивности (плотности потока энергии) излучения  $P$ . Графики соответствуют частотам излучения:  $\omega=0.6$  (линия 1),  $\omega=0.3$  (линия 2),  $\omega=0.2$  (линия 3). На этих частотах в слабом поле доминируют одно-, двух- и трех-фотонные процессы и зависимость вероятности от интенсивности излучения выглядит, соответственно, как  $w \sim P^1, P^2, P^3$ .

На рис. 2 представлена рассчитанная вероятность фотоионизации атома водорода в зависимости от частоты в слабом поле ( $P \sim 10^{-3}$ ). Четко воспроизводятся пороги одно- и двух-фотонной ионизации. Пороговая зависимость сглажена за счет спектральной ширины импульса  $\Delta\omega \sim 2\pi/\tau$  ( $\tau=100$ ). Наш метод дает результат (линия 1), согласующийся с результатами, полученными в [6] на основе численного решения нестационарного уравнения Шредингера (линия 2) и на основе приближения Кулона-Волкова (линия 3).

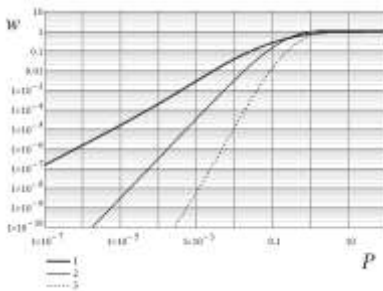


Рис. 1. Зависимость вероятности фотоионизации атома водорода от интенсивности излучения

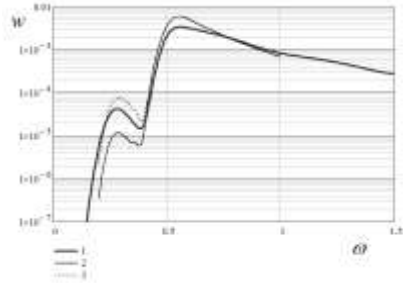


Рис. 2. Рассчитанная вероятность фотоионизации атома водорода в зависимости от частоты в слабом поле

#### Список литературы

1. Бычков А.Б., Кожина А.С., Митюрева А.А., Смирнов В.В. // Оптика и спектроскопия. (принято в печать)
2. Bichkov A.B., Kozhina A.S., Smirnov V.V. // Phys. Lett. A 2016. V.380. P.1263-1266.
3. Bichkov A.B., Smirnov V.V. // Eur. Phys. J. D. 2015. V.69. Is.8. 190.
4. Bichkov A.B., Smirnov V.V. // J. Phys. A: Math. and Theor. 2013. V.46. 015303.
5. Bichkov A.B., Smirnov V.V. // Laser Phys. 2013. V.23. 055302.
6. Duchateau G., Cormier E., Gayet R. // Phys. Rev. A. 2002. V.66. 023412.

В.А. ХАЛЯПИН, А.Н. БУГАЙ<sup>1</sup>*Калининградский государственный технический университет  
<sup>1</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна***ФОТОИОНИЗАЦИЯ И ПОДАВЛЕНИЕ ВЫНУЖДЕННОГО  
КОМБИНАЦИОННОГО САМОРАССЕЯНИЯ**

С помощью метода моментов получено аналитическое выражение, описывающее смещение частоты импульса, обусловленное как вынужденным комбинационным рассеянием, так и фотоионизацией.

V.A. KHALYAPIN, A.N. BUGAY<sup>1</sup>*Kaliningrad State Technical University  
<sup>1</sup>Joint Institute of Nuclear Researches, Dubna***PHOTOIONIZATION AND SUPPRESSION OF INTRAPULSE  
RAMAN SCATTERING**

We derive explicit analytic expressions for the evolution of spectral shift, caused by Raman scattering and photoionization. The analysis is based on the moment method.

Уравнение, описывающее распространение квазимонохроматических импульсов при учете дисперсии третьего порядка, производной нелинейности, вынужденного комбинационного рассеяния и эффекта фотоионизации имеет вид [1]

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \tau^2} - \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 \psi}{\partial \tau^3} - i\gamma \psi |\psi|^2 - \frac{\gamma}{\omega} \frac{\partial}{\partial \tau} (\psi |\psi|^2) +$$

$$+ i\gamma T_R \psi \frac{\partial |\psi|^2}{\partial \tau} + i\eta \psi \int_{-\infty}^{\tau} |\psi|^2 d\tau' = 0. \quad (1)$$

Здесь  $\psi$  – огибающая поля импульса,  $\omega$  – центральная частота импульса,  $\beta_2$  – коэффициент групповой дисперсии,  $\beta_3$  – коэффициент, характеризующий дисперсию третьего порядка.  $\gamma$  – коэффициент при кубической нелинейности,  $T_R$  – параметр, описывающие вклад вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР),  $\eta$  – характеризует вклад фотоионизации  $\tau$  – время в сопутствующей системе координат,  $z$  – ось, вдоль которой распространяется сигнал.

Анализ динамики параметров импульса проводится на основе метода моментов [2]. Пробную функцию для огибающей поля выберем в виде

$$\psi = B \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\tau - T}{\tau_p} \right)^2 + i \left( \varphi - \Omega(\tau - T) - \frac{C}{2} \left( \frac{\tau - T}{\tau_p} \right)^2 \right) \right]. \quad (2)$$

Здесь  $\tau_p$  – длительность сигнала,  $C$  – определяет модуляцию частоты,  $T$  – характеризует добавку к групповой скорости.  $B$  – амплитуда сигнала. Решая систему для моментов, находим уравнение для смещения частоты

$$\Omega = \frac{|\gamma| E T_R}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z \frac{dz}{\tau_p^3} + \frac{1}{\omega \beta_2} \left( \frac{1}{\tau_0} - \frac{1}{\tau_p} \right) - \frac{|\eta| E}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z \frac{dz}{\tau_p}, \quad (3)$$

где  $E$  – величина пропорциональная мощности импульса, а  $\tau_0$  – его начальная длительность. Из (3) видно, что эффект фотоионизации приводит к синему сдвигу и способен компенсировать красное смещение, вызванное вынужденным комбинационным рассеянием. Решая полную систему уравнений на параметры импульса, можно найти явное выражение для длительности сигнала. Таким образом, из (3) не сложно получить аналитическое выражение и для смещения частоты.

*Список литературы*

1. Saleh M.F., Chang W., Holzer P., Nazarkin A., Travers J.C., Joly N.Y., Russell P., Biancalana F. // Phys. Rev. Lett. 2011. 107. 203902.
2. Santhanam J. // Opt.Commun. 2003. 222. P.413-420.

С.А. АСТАШКЕВИЧ

*Санкт-Петербургский государственный университет***ИНФОРМАЦИОННАЯ ЭНТРОПИЯ  
ВЫСОКОВОЗБУЖДЕННЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ  
СОСТОЯНИЙ ИЗОТОПОЛОГОВ ДИМЕРА ЛИТИЯ**

Квантово-механически численно рассчитаны и проанализированы информационные энтропии (Шеннона, Цаллиса и Реньи) для высоковозбужденных колебательных состояний  ${}^{6,6}\text{Li}_2$ ,  ${}^{6,7}\text{Li}_2$  и  ${}^{7,7}\text{Li}_2$  и установлена их существенная неклассичность, связанная со значительной нелокальностью плотности вероятности для этих состояний.

S.A. ASTASHKEVICH

*Sankt-Petersburg State University***INFORMATION ENTROPY FOR HIGH EXCITED VIBRATIONAL  
STATES OF LITHIUM DIMER ISOTOPOLOGUES**

Information entropies (Shannon, Tsallis and Rényi) for high excited vibrational states of  ${}^{6,6}\text{Li}_2$ ,  ${}^{6,7}\text{Li}_2$  and  ${}^{7,7}\text{Li}_2$  were quantum-mechanically numerically calculated and analyzed. It was established that ones are significantly non-classical because considerable nonlocality of the probability density function for these states.

Высоковозбужденные колебательные уровни основного электронного состояния димера лития играют важную роль в процессах диссоциации и создания ультрахолодных атомов Li, которые представляют большой интерес с точки зрения создания оптических решеток, голографического детектирования и др. [1]. Эти уровни сильно нелокальны. Для изотопологов  ${}^{6,6}\text{Li}_2/{}^{6,7}\text{Li}_2/{}^{7,7}\text{Li}_2$  наиболее возбужденные колебательные уровни  $v=37/39/40$  имеют правую классическую точку поворота  $r_+=23.7/35.8/23.7$  ат. ед., согласно проведенному нами расчету с помощью данных о потенциальной кривой из [2]. Численно решая колебательное уравнение Шредингера с этими данными, для этих изотопологов нами были рассчитаны (в ат. ед.) зависимости информационной энтропии Шеннона от  $v$  в координатном  $S[r]$  (рис. 1) и импульсном  $S[p]$  (рис. 2) пространствах, характеризующие глобальную нелокальность плотности вероятности [3]. Видна существенная нелинейность этих зависимостей, причем для всех трех изотопологов зависимости  $S[r]$  от  $v$  монотонны, а зависимости  $S[p]$  от  $v$  имеют максимум. Анализ этих данных показывает,



что наиболее возбужденные колебательные состояния обладают наибольшей информационной энтропией в координатном пространстве и наименьшей – в импульсном пространстве.

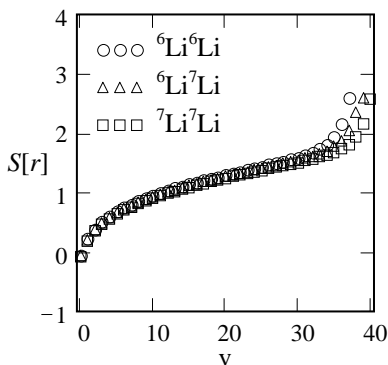


Рис. 1. Зависимость информационной энтропии Шеннона от  $v$  в координатном  $S[r]$  пространстве

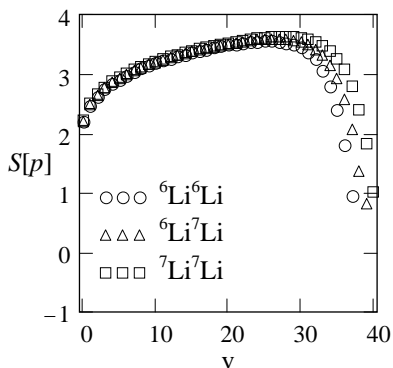


Рис. 2. Зависимость информационной энтропии Шеннона от  $v$  в импульсном  $S[p]$  пространстве

Для исследуемых колебательных состояний нами также были проведены расчеты  $q$ -энтропии Цаллиса и  $\alpha$ -энтропии Реньи [3] для различных значений параметров  $q$  и  $\alpha$ , которые показали аналогичные особенности зависимостей этих информационных энтропий от  $v$ .

Также нами был проведен расчет зависимости  $S[r]$  от  $v$  в приближении классической механики, исходя из того, что классическая плотность вероятности обратна пропорциональна импульсу колебания молекулы  $p$ . Сравнение результатов классического и квантово-механического расчетов показало значительные расхождения между этими данными, причем не только для нижних, но и (до 25%) для высоковозбужденных колебательных уровней  ${}^6\text{Li}_2$ ,  ${}^6\text{Li}^7\text{Li}$  и  ${}^7\text{Li}_2$ . Это связано со значительной нелокальностью колебательной волновой функции и говорит о существенной неклассичности высоковозбужденных колебательных состояний димера лития [4].

Полученные результаты могут быть использованы для оптического контроля и управления высоко возбужденными колебательными уровнями  $\text{Li}_2$ . Работа выполнена в рамках проекта РФФИ (заявка № 17-03-01339).

#### Список литературы

1. Hoffmann D.K., Deissler B., Limmer W., et al. // Appl. Phys. B. 2016. V.122. № 8. P.227.
2. Gunton W., Semczuk M., Dattani N.S., et al. // Phys. Rev. A. 2013. V. 88. № 6. P.062510.
3. Toranzo I.V., Puertas-Conteno D., Dehesa J.S. // Physica A. 2016. V.462. P.1197.
4. Асташкевич С.А. // Оптика и спектроскопия. 2017. (в печати).

А.Н. ХОПЁРСКИЙ, А.М. НАДОЛИНСКИЙ, Р.В. КОНЕЕВ  
*Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону*

## СЛИЯНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ФОТОНОВ В ПОЛЕ АТОМНОГО ИОНА

Теоретически исследован процесс слияния трех рентгеновских фотонов в один в поле атомного иона. В области энергий падающего фотона  $\hbar\omega \cong I_{1s}/2$  ( $I_{1s}$  – энергия порога ионизации  $1s$ -оболочки иона) предсказаны ярко выраженная резонансная структура и сильная угловая анизотропия дифференциального сечения слияния. Дана оценка абсолютной величины наблюдаемого сечения слияния.

A.N. HOPERSKY, A.M. NADOLINSKY, R.V. KONEEV  
*Rostov State Transport University, Rostov-on-Don*

## MERGING OF X-RAY PHOTONS IN AN ATOMIC ION FIELD

Theoretically investigate the process of merging of three X-ray photons into one in the field of a free atomic ion. In the energy region with  $\hbar\omega \cong I_{1s}/2$  ( $I_{1s}$  – is the energy of the ionization threshold of the  $1s$ -atomic ion shell) for the incident photon we find a pronounced resonant structure and a strong angular anisotropy of differential merging cross section. We provide an estimate for the maximum absolute value of the observed differential merging cross section.

С созданием рентгеновского лазера на свободных электронах (XFEL; [1]) открывается возможность исследования фундаментальных процессов нелинейного взаимодействия рентгеновского излучения с многоэлектронной системой. К нелинейным процессам, наряду, например, со слиянием лазерных фотонов в Кулоновском поле протона [2], Комптоновским [3] и Рэлеевским [4] рассеянием двух фотонов атомом, относится процесс слияния фотонов в поле атома (атомного иона).

Целью нашей работы явилось построение нерелятивистского варианта квантовой теории процесса слияния трех XFEL-фотонов в один фотон в поле атома и элемента его изоэлектронной последовательности. В качестве объектов исследования взяты атом Ne и неоподобный ион  $Si^{4+}$ . Результаты расчета дифференциального сечения слияния представлены на рис. 1. В области энергий  $\hbar\omega \cong I_{1s}/2$  видна ярко выраженная резонансная структура спектра слияния. Наряду с этим результатом установлен эффект

сильной угловой анизотропии процесса: с наибольшей вероятностью три падающих на атом (ион) XFEL-фотона сливаются в один фотон для углов рассеяния  $90^\circ \div 180^\circ$  (рассеяние назад).

Следует ожидать, что планируемый в ближайшие годы уровень яркости (число фотонов в лазерном пучке,  $N = 10^n$ ) XFEL-излучения позволит экспериментально зарегистрировать эффект слияния. Например, для  $n = 29$  [5], угла рассеяния  $150^\circ$  и  $\hbar\omega = 926.10$  эВ для иона  $\text{Si}^{4+}$  получаем вполне доступную для измерения оценку абсолютного значения сечения слияния  $C_N^3(d\sigma_\perp/d\Omega) \cong 1.12$  (Гб·ср.<sup>-1</sup>), где  $C_N^3$  – биномиальный коэффициент.

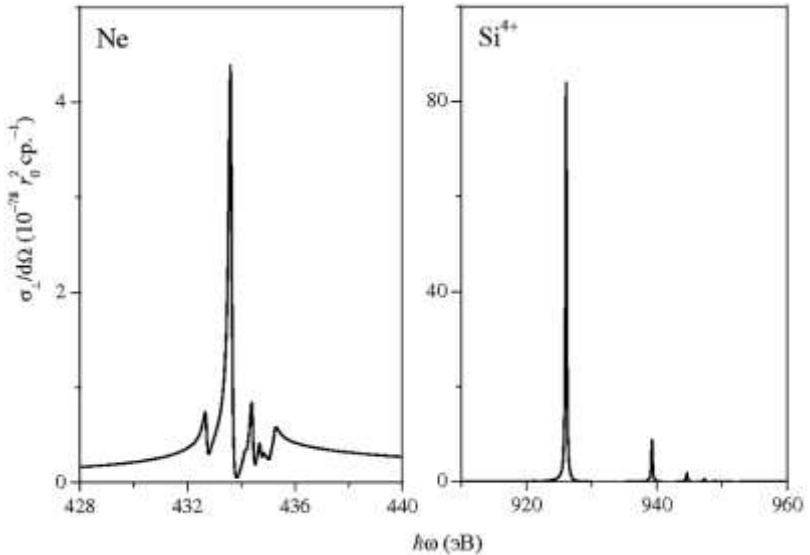


Рис. 1. Дифференциальные сечения слияния трех линейно поляризованных (перпендикулярно плоскости рассеяния,  $\perp$ ) XFEL-фотонов в один фотон в поле атома Ne и неоноподобного иона  $\text{Si}^{4+}$

*Список литературы*

1. Pellegrini C., Marinelli A., Reiche S. // Rev. Mod. Phys. 2016. V.88. P.015006.
2. Di Piazza A., Hatsagorssyan K.Z., Keitel C.H. // Phys. Rev. Lett. 2008. V.100. P.010403.
3. Hopersky A.N., Nadolinsky A.M., Novikov S.A. // Phys. Rev. A. 2015. V.92. P.052709.
4. Hopersky A.N., Nadolinsky A.M., Novikov S.A. // Phys. Rev. A. 2016. V.93. P.052701.
5. Bucksbaum Ph.H., Berrah N. // Physics Today. 2015. V.68. P.26.

**В.С. МАКИН, Р.С. МАКИН<sup>1</sup>**

*Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения,  
Сосновый Бор, Ленинградская обл.*

*<sup>1</sup>Димитровградский инженерно-технологический институт НИЯУ МИФИ,  
Ульяновская обл.*

## **О МОДЕЛИ РАЗРУШЕНИЯ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА УКИ-ИЗЛУЧЕНИЕМ**

На основе анализа теоретических и экспериментальных данных по разрушению кварцевых стекол поляризованным ультракоротко-импульсным (УКИ) лазерным излучением сделан вывод об адекватности описания их разрушения в рамках универсальной поляритонной модели.

**V.S. MAKIN, R.S. MAKIN<sup>1</sup>**

*Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor,  
Leningrad region*

*<sup>1</sup>Dimitrovgrad Engineering and Technological Institute NRNU MEPHI, Ulyanovsk region*

## **ABOUT QUARTZ GLASS DAMAGE MODEL BY ULTRAFAST RADIATION**

Based on the analysis of theoretical and experimental results of quartz based glasses damage by polarized ultrafast laser radiation the conclusion is made about the universal polariton model adequacy.

В последнее десятилетие существенное внимание уделяется выяснению механизмов разрушения объема и поверхности стекол, в основном в режиме воздействия ультракоротких импульсов лазерного излучения [1, 2]. Для объяснения явления образования решеток наноструктур предлагались различные модели, включая основанную на возбуждении акустоэлектронной волны, возбуждении и интерференции экситонных поляритонов, интерференции с участием излучения, рассеянного дефектами, универсальную поляритонную модель (УПМ) и другие.

Ниже на основе анализа опубликованных теоретических и экспериментальных данных приведен ряд доводов в пользу справедливости УПМ. В поляритонной модели отсутствуют ограничения на длительность импульса лазерного излучения; необходимо лишь выполнение условий существования поверхностных плазмон поляритонов

(ППП). Поэтому можно ожидать реализации УПМ в режиме воздействия импульсов наносекундной длительности. Экспериментальные результаты [3] следует рассматривать как реализацию УПМ для наносекундных импульсов излучения; при этом характерные плотности энергии ( $Q$ ) ( $\sim 50$  Дж/см<sup>2</sup>) оказываются на порядок выше типичных пороговых значений. Период и ориентация решеток ( $\mathbf{g}$ ), образующихся под действием импульса линейно поляризованного излучения, падающего по нормали к поверхности  $d=\lambda/2\eta$ ,  $\mathbf{g} \parallel \mathbf{E}$  ( $\lambda=1064$  нм,  $\tau=12$  нс), как и стабильность периода структур в диапазоне величин  $Q$  ( $40\div 80$ ) Дж/см<sup>2</sup>, укладываются в рамки УПМ и отвечают взаимной интерференции ППП противоположных направлений распространения. В более ранних экспериментах с излучением наносекундой длительности была обнаружена металлизация стекла К-8 на временах  $\sim 200$  пс (Ефимов О.М.).

В ряде работ в режиме УКИ-облучения обнаружены ранние промежуточные стадии разрушения объема кварцевого стекла, предшествующие образованию периодического рельефа. К ним относится, например, «точечная» металлизация, т.е. образование ансамбля сильно поглощающих поверхностных плазмонов [4]. Конечным результатом воздействия являлось формирование решеток в объеме или на поверхности стекла, период и ориентация которых соответствуют выводам УПМ. Были обнаружены решетки с малыми пространственными периодами, вплоть до величин порядка 70 нм [5]. Их образование также укладывается в рамки УПМ, с учетом нелинейной математической модели образования пространственно периодических решеток [6], в частности, универсальности Фейгенбаума.

Еще одной особенностью УПМ является наноструктурирование впадин (гребней) основных резонансных структур – формирование решеток аномальной ориентации. Такие структуры наблюдаются и на кварцевых стеклах; их следы обнаруживаются как в режиме воздействия наносекундных импульсов, так и в режиме УКИ излучения на ZnO, и связаны с взаимной интерференцией клиновых ППП [7].

#### *Список литературы*

1. Huang M., Cheng Y. et al. // Ann. Phys. 2013. V.525. No 1-2. P.74-86.
2. Zimmermann F., et al. // Laser & Photonics Rev. 2016. V.10. No 2. P.327-334.
3. Sun W., Qi H., et al. // Appl. Surface Science. 2014. V.309. P.79-84.
4. Gertsof M., Jean-Real H., et al. // Phys. Rev. Letters. 2008. V.101. P.243001.
5. Liao Y., Ni J., Qiao L., et al. // Optica. 2015. V.2. No 4. P.329-334.
6. Макин В.С., Макин Р.С. и др. // Письма в ЖТФ. 2008. Т.34. Вып.9. С.55-64.
7. Макин В.С. и др. // Оптика и спектроскопия. 2016. Т.120. №4. С.641-646.

Д.А. ДОБРИНА, В.П. ВЕЙКО, Е.В. ЛЕБЕДЕВА, Д.А. СИНЕВ  
*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

**АЛЮМОСИЛИКАТНАЯ ТОНКОСТЕННАЯ СФЕРА,  
ИНДУЦИРУЕМАЯ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ:  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ  
ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ**

Исследовано воздействие инфракрасного лазерного излучения на поверхность алюмосиликатного керамического материала, смоченного вспомогательной жидкостью (дистиллированной водой) в зоне обработки. Выявлено образование тонкостенных стеклянных сфер миллиметрового размера над отверстием, сформированным в результате лазерной абляции. С помощью скоростной видеозаписи зафиксирована температурная и размерная кинетика зоны абляции в процессе и после окончания лазерного воздействия, на основании чего сделан вывод о существенном влиянии вспомогательной жидкости на характер протекания процесса лазерного сверления отверстия. Изучены прочностные характеристики полученных миллиметровых линз. Изучены зависимости размеров сферических микрочастиц, выбрасываемых из зоны абляции, от параметров лазерного воздействия.

D.A. DOBRINA, V.P. VEIKO, E.V. LEBEDEVA, D.A. SINEV  
*ITMO University, Saint-Petersburg*

**ALUMINOSILICATE THIN-WALLED LASER-INDUCED  
SPHERE: EXPERIMENTAL STUDY OF PROCESS  
FORMATION'S KINETICS**

The impact of infrared laser radiation on the surface of the aluminosilicate ceramic plate moistened with an auxiliary liquid (distilled water) in the treatment zone was investigated. The formation of glass milli-spheres above the hole caused by laser ablation was revealed. Temperature and dimensional kinetics of the ablation zone were recorded via high-speed video during and after the process of laser treatment, that allowed us to show a significant influence of the auxiliary liquid on the ablation kinetics process. The strength characteristics of the millimeter lens-spheres was studied. The size dependence of spherical microparticles emitted from the zone of ablation regarding laser parameters was presented.

При лазерной обработке керамического материала (72% SiO<sub>2</sub>, 27% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и менее чем 1% FeO<sub>2</sub>) нами ранее [1] был зафиксирован эффект

возникновения стеклянных сфер размерами до 5 мм, сформированных под давлением испаряющейся из пор воды, из фазы расплава.

Настоящая работа посвящена подробному исследованию зависимости характеристик сфер от параметров излучения, процессу формирования (рис. 1), а также зависимости размеров микросфер, выбрасываемых в процессе абляции, от параметров лазерного воздействия. Приведены сведения о температурном и кинетическом поведении жидкой фазы в зависимости от параметров воздействия (плотность мощности, длительность воздействия частоты следования импульсов). Представлены результаты экспериментов по измерению прочностных характеристик полученных образцов.

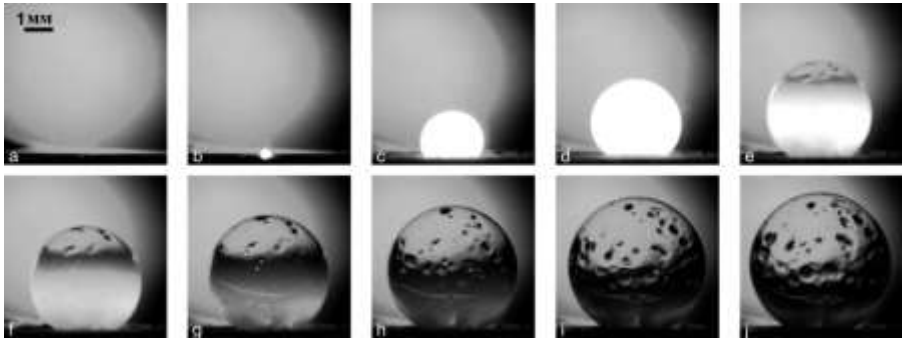


Рис. 1. Поверхность керамического образца: до лазерного воздействия (а); начало лазерного воздействия с плотностью мощности  $40 \text{ ГВт/м}^2$  (б); конец лазерного воздействия ( $t \approx 1,5 \text{ с}$ ) (с) –(j) 50 мс, 100 мс, 150 мс, 200 мс, 250 мс, 300 мс и 350 мс после окончания лазерного воздействия соответственно

*Список литературы*

1. Sinev D.A., Dobrina D.A., Strusevich A.V., Veiko V.P., Baranov M.A., Yakusheva A.A. Special regime of liquid-assisted laser ablation of ceramics. // Appl. Phys. A-Mater. 2016. V.122. P.546.

И.О. ОРЕХОВ, Д.А. ДВОРЕЦКИЙ, С.Г. САЗОНКИН,  
И.С. КУДЕЛИН, А.Б. ПНЕВ, В.Е. КАРАСИК, Л.К. ДЕНИСОВ  
*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

**ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАЦИИ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ  
ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ПОЛНОСТЬЮ  
ВОЛОКОННОМ КОЛЬЦЕВОМ ЭРБИЕВОМ ЛАЗЕРЕ  
С ВЫСОКОНЕЛИНЕЙНЫМ РЕЗОНАТОРОМ**

В работе получена генерация и исследована эволюция длительности фемтосекундных импульсов в полностью волоконном эрбиевом лазере с высоконелинейным резонатором.

I.O. OREKHOV, D.A. DVORETSKIY, S.G. SAZONKIN,  
I.S. KUDELIN, A.B. PNEV, V.E. KARASIK, L.K. DENISOV  
*Bauman Moscow State Technical University*

**GENERATION AND PROPAGATION PECULARITIES  
OF FEMTOSECOND PULSES IN AN ALL-FIBER  
ERBIUM-DOPED RING LASER WITH A HIGHLY  
NONLINEAR RESONATOR**

In this work was obtained generation femtosecond pulses and investigated the evolution of the duration of pulses in erbium all-fiber lasers with highly nonlinear cavity.

В последние два десятилетия волоконные лазеры ультракоротких импульсов (УКИ), работающих в режиме синхронизации мод широко используются в различных областях науки и техники [1]. В данной работе получена генерация и исследована эволюция УКИ в полностью волоконном лазере с кольцевым резонатором, образованным активным эрбиевым волокном ( $\text{Er}^{3+}$ ), высоконелинейным германо-силикатным волокном (HNLF с концентрацией оксида германия в сердцевине  $\sim 50$  мол.%) и волокном SMF-28(Corning Corp.). Отметим, что суммарная внутрирезонаторная дисперсия групповых скоростей оказалась равной  $\sim -0,018$  пс<sup>2</sup> на длине волны 1550 нм [2]. Схема кольцевого резонатора полностью волоконного лазера представлена на рис. 1. На рис. 2 показан спектр УКИ при выходной мощности  $\sim 27$  мВт, шириной на полувысоте равной  $\Delta\lambda_{\text{FWHM}} \sim 21,5$  нм и частотой повторения  $\sim 10, 24$  МГц.



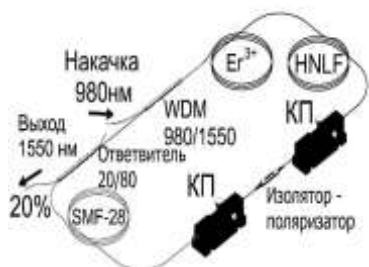


Рис. 1. Схема кольцевого волоконного эрбиевого лазера

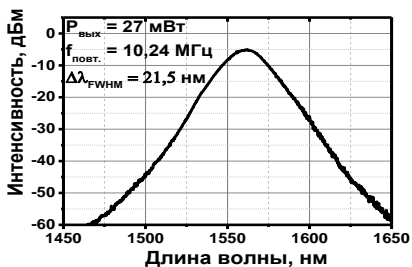


Рис 2. Спектр УКИ

На рис. 3 приведена автокорреляция по интенсивности и фаза дечирпированного УКИ гауссовской формы, полученного при длине волокна SMF-28 от выходного волоконного ответвителя равной  $\sim 2,2 \text{ м}$ . Отметим, что оценка длительности УКИ по полувысоте дает значение равное 180 фс. Эволюция импульса на выходе из резонатора приведена на рис. 4.

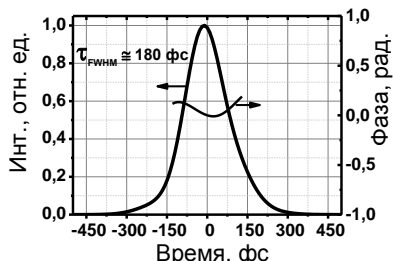


Рис. 3. Автокорреляция по интенсивности и фазе УКИ

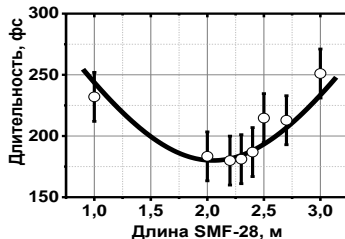


Рис. 4. Эволюция УКИ

Полученная зависимость длительности УКИ от длины волокна близка к функции, соответствующей гауссовской эволюции импульса, описываемой формулой  $\tau_p = \tau_{\text{min}} \cdot \sqrt{1 + ((L - L_0)/L_D)^2}$  с дисперсионной длиной УКИ  $L_D$  равной 1,15 м [3].

#### Список литературы

1. Fermann M., Hartl I. Ultrafast fiber laser technology // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2009. V.15. P.191-206.
2. Dvoretzkiy D.A., et al. High-energy, sub-100 fs, all-fiber stretched-pulse mode-locked Er-doped ring laser with a highly-nonlinear resonator // Opt. Express. 2015. V.23. P.33295.
3. Krylov A.A, et al. // Laser Physics Letters. 2015. V.12. Is.6. P.06500.

О.С. КРОЛЕВЕЦ, М.Е. ЛЕВИЦКИЙ<sup>1</sup>

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
<sup>1</sup>Научно-внедренческое предприятие «Топаз», Томск*

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА  
ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
ИНТЕНСИВНОСТИ С ПОМОЩЬЮ УПРАВЛЕНИЯ ФАЗАМИ  
В МНОГОКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ  
ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ**

Приведена экспериментальная установка для формирования распределения интенсивности с помощью управления фазами в многоканальной системе волоконных лазеров

O.S. KROLEVETS, M.E. LEVITSKIY<sup>1</sup>

*National Research Tomsk Polytechnic University  
<sup>1</sup>TOPAZ Ltd., Tomsk*

**THE EXPERIMENTAL INSTALLATION FOR FORMING  
THE INTENSITY DISTRIBUTION USING THE PHASE  
CONTROL IN A MULTICHANNEL SYSTEM  
OF FIBER LASERS**

Presents an experimental installation for forming the intensity distribution using the phase control in a multichannel system of fiber lasers.

Задача объединения лазерных пучков представляет большой интерес с точки зрения использования в лазерных технологиях. Целью работы является исследование возможностей создания пучков с различным распределением интенсивности, в частности скалярных вихревых пучков [1], обладающих нулевой интенсивностью в центре пучка, используя методы фазирования, которые применяются в задачах когерентного суммирования лазерных пучков [2].

На рис. 1 представлена оптическая схема для реализации системы, формирующей синтезированные пучки с использованием методов фазирования пучков волоконных лазеров. Излучение волоконного лазера (1) разделяется на семь каналов с помощью набора волоконных разветвителей (2). Каналы направляются на шести-апертурный коллиматор (3), который формирует параллельные пучки,

ориентированные гексагонально. Каждый канал направляется на коллиматор через фазосдвигающую ячейку. Длиннофокусная линза (4) предназначена для формирования аналога дальнеполюсного распределения излучения. Для анализа распределения интенсивности синтезированного пучка используется датчик SP503U. Размер пучка в фокальной плоскости дальнеполюсной линзы определяется с помощью камеры с микрообъективом (7), на которую падает часть излучения, разделенного светоделительной пластиной (6). Остальная часть излучения направляется на фотодиод (9) с диафрагмой диаметром 10 – 15 мкм, расположенный в фокусе линзы. Фотодиод служит для формирования канала обратной связи, который предназначен для управления фазосдвигающими ячейками, посредством многоканального контроллера (10). Так как в системе существуют фазовые флуктуации, контроллер работает последовательно следующим образом: сначала все пучки фазуются, затем фазовое состояние одного пучка фиксируется, а остальные фазы пучков сдвигаются  $\pi/6$  относительно друг друга, тем самым, создавая оптически вихревой пучок, состояние которого является периодическим.

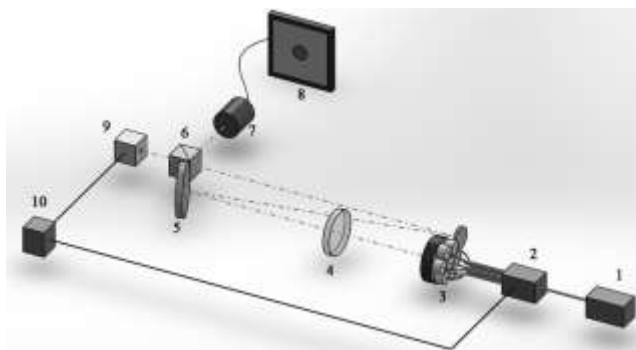


Рис. 1. Структурная схема системы формирования синтезированных пучков на основе когерентного сложения пучков волоконных лазеров.

- 1 – лазер; 2 – волоконный разветвитель; 3 – семиапертурный коллиматор;  
 4 – длиннофокусная линза; 5 – зеркало; 6 – светоделитель;  
 7 – камера с микрообъективом; 8 – монитор; 9 – фотодиод; 10 – контроллер

#### *Список литературы*

1. Duocastella M., Arnold C.B. Bessel and annular beams for materials processing // Laser Photonics Rev. 2012. 6. No 5. P.607-621.
2. Fan T.Y. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources // IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron. 2005. V.11. No 3. P.567-577.

С.В. РЯБЧУК<sup>1</sup>, С.А. ГОНЧАРОВ<sup>1</sup>, Д.В. МОКРОУСОВА<sup>2</sup>,  
Л.В. СЕЛЕЗНЕВ<sup>2</sup>, Е.С. СУНЧУГАШЕВА<sup>2</sup>, Н.Н. УСТИНОВСКИЙ<sup>2</sup>,  
А.В. ШУТОВ<sup>2</sup>, В.Д. ЗВОРЫКИН<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

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

## ПОДАВЛЕНИЕ МНОЖЕСТВЕННОЙ ФИЛАМЕНТАЦИИ СУБТЕРАВАТТНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В КСЕНОНЕ

Эффективное подавление множественной филаментации субтераваттного лазерного пучка было продемонстрировано для субпикосекундных УФ импульсов на Ti:Sa–KrF лазерной системе ГАРПУН-МТВ. Большой отрицательный нелинейный показатель преломления ксенона обеспечивал гомогенизацию лазерного излучения. УФ филаменты при прохождении через Xe генерировали узконаправленную монохроматическую коническую эмиссию на длине волны 828 нм.

S. V. RYABCHUK<sup>1</sup>, S. A. GONCHAROV<sup>1</sup>, D. V. MOKROUSOVA<sup>2</sup>,  
L. V. SELEZNEV<sup>2</sup>, E. S. SUNCHUGASHEVA<sup>2</sup>, N. N. USTINOVSKII<sup>2</sup>,  
A. V. SHUTOV<sup>2</sup>, V. D. ZVORYKIN<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

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

## SUPPRESSION OF MULTIPLE FILAMENTATION OF THE SUB-TW PEAK POWER UV LASER BEAM IN XENON

An effective suppression of multiple filamentation of the sub-TW peak power laser beam in xenon gas was demonstrated in direct amplification of subpicosecond UV pulses at Ti:sapphire/KrF laser facility GARPUN-MTW. A large negative nonlinear refractive index of Xe ensured homogenization of the laser radiation. UV filaments in Xe produced a coherent monochromatic cone emission at 828 nm wavelength.

При усилении субпикосекундных УФ лазерных импульсов на Ti:Sa–KrF лазерной системе ГАРПУН-МТВ достигается субтераваттная пиковая мощность излучения. Это на 3 порядка превышает критическую мощность самофокусировки (~ 0.1 ГВт) для длины волны 248 нм [1]. Самофокусировка пучка происходит из-за положительной нелинейной добавки к показателю преломления в воздухе и приводит к множественной филаментации (МФ) – распаду пучка на множество нитей

– филамент с характерным диаметром  $\sim 300$  мкм, интенсивность в которых достигает  $0,2$  ТВт/см<sup>2</sup>, что в 200 раз превышает среднюю интенсивность пучка. МФ приводит к деградации окон усилителей и возрастанию нелинейных потерь в оптических элементах схемы усиления [2].

В настоящей работе продемонстрировано, что МФ лазерного пучка, который содержит примерно 300 филамент, может эффективно подавляться в Хе за счет его отрицательного нелинейного показателя преломления на длине волны КгF лазера [3]. Усиленные импульсы с энергий  $\sim 0,1$  Дж пропускались через ячейку с Хе длиной 2,5 м при давлении до 1 атм. При прохождении через Хе происходила дефокусировка филамент и разглаживание прочих неоднородностей интенсивности (рис. 1). Измеренные потери энергии при распространении в ксеноне составили около 20% [4].

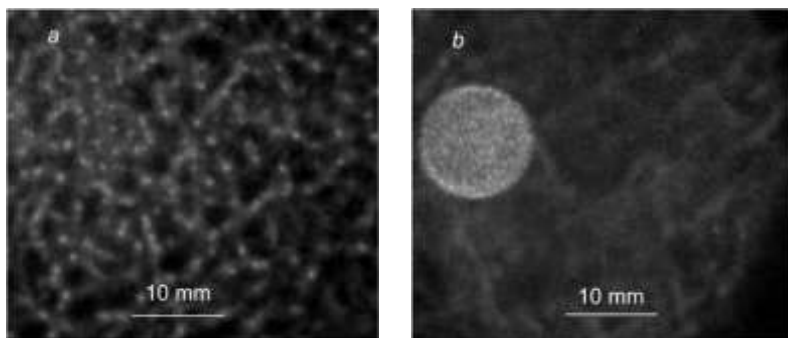


Рис. 1. Распределение пучка без (а) и с (б) использованием ячейки с ксеноном

При распространении УФ излучения в Хе в этих же экспериментах было зарегистрировано узкополосное когерентное излучение на длине волны 828 нм на переходе  $6p[1/2]_0 \rightarrow 6s[3/2]_1^0$ , вызванное двухквантовым резонансным возбуждением верхнего уровня. Оно представляло собой монохроматическую коническую эмиссию под углом  $\sim 4$  мрад к излучению накачки, обусловленную предположительно вынужденным гипер-рамоновским рассеянием.

#### *Список литературы*

1. Zvorykin V.D., Ionin A.A., Levchenko A.O., et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 2015. 355. P.227-231.
2. Zvorykin V.D., Ionin A.A., Levchenko A.O., et al. // Quantum Electronics. 2014. 44. P.431.
3. Lehmbert R.H., et al. // Opt. Commun. 1995. 121. P.78.

С.А. ГОНЧАРОВ<sup>1</sup>, С.В. РЯБЧУК<sup>1</sup>, А.В. ШУТОВ<sup>2</sup>,  
В.Д. ЗВОРЫКИН<sup>1,2</sup>, Е.С. СУНЧУГАШЕВА<sup>2</sup>, Д.В. МОКРОУСОВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

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

## **РЕГУЛЯРИЗАЦИЯ МНОЖЕСТВЕННОЙ УФ-ФИЛАМЕНТАЦИИ В ВОЗДУХЕ МЕТОДОМ АМЛИТУДНЫХ МАСОК**

Приведены результаты экспериментов по исследованию распространения суперкритических лазерных импульсов при регуляризации его поперечного сечения в воздухе на протяженных трассах. Созданы упорядоченные структуры филаментов. Установлены их физические ограничения, такие как нелинейный набег фазы за счет керровской самофокусировки и длина турбулентности.

S.A. GONCHAROV<sup>1</sup>, S.V. RYABCHUK<sup>1</sup>, A.V. SHUTOV<sup>2</sup>,  
V.D. ZVORYKIN<sup>1,2</sup>, E.S. SUNCHUGASHEVA<sup>2</sup>,  
D.V. MOKROUSOVA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

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

## **REGULARIZATION OF UV MULTIPLE FILAMINTATION IN AIR BY METHOD OF AMPLITUDE MASKS**

Results of experiments on a research of distribution of supercritical laser impulses at regularization of his cross-section in air on extended routes are given. The ordered structures of filaments are created. Their physical restrictions, such as nonlinear phase progression due to Kerr-induced self-focusing and turbulence length are set.

Структуры упорядоченных филаментов могут применяться для задач, связанных с мониторингом атмосферы и для создания плазменных волноводов для транспортировки СВЧ-излучения [1, 2].

На гибридной Ti:Sa-KrF лазерной системе ГАРПУН-МТВ было проведено экспериментальное исследование возможности регуляризации множественной филаментации при распространении суперкритического пикосекундного лазерного импульса методом амплитудных масок. Лазер генерировал импульсы длительностью  $\sim 1$  пс с энергией  $\sim 1$  Дж и соответствующей пиковой мощностью около 1 ТВт, что в сравнении с критической мощностью самофокусировки для УФ-излучения ( $\sim 0.1$  ГВт)

давало суперкритический пучок, содержащий  $\sim 1000$  критических мощностей самофокусировки, формировавший при распространении в воздухе  $\sim 300$  филаментов с характерным размером филамента  $\sim 300$  мкм. В целях создания условий для регуляризации структуры множественной филаментации, на пути распространения излучения в дофиламентационной области помещались различные амплитудные маски с разным количеством отверстий и формы. Визуализация филаментации производилась за счет регистрации флюоресценции стекла К8, находящегося в падающем пучке с помощью ПЗС матрицы. При перемещении системы регистрации вдоль пути распространения лазерного импульса удалось получить поперечные профили излучения на различных расстояниях. В случае, когда матрица помещалась сразу за маской, наблюдалась линейная геометрическая тень от маски (рис. 1а). При удалении системы регистрации на расстояние  $\sim 5$  м от маски отчетливо наблюдался линейный эффект - дифракция на множественных отверстиях, проявляющаяся как суперпозиция дифракций отдельных отверстий (рис. 1б). На расстояниях  $\sim 25$  м преобладал нелинейный эффект - самофокусировка лазерного пучка (рис. 1в), в результате которой образовывались упорядоченные структуры, состоящие из одиночных филаментов.

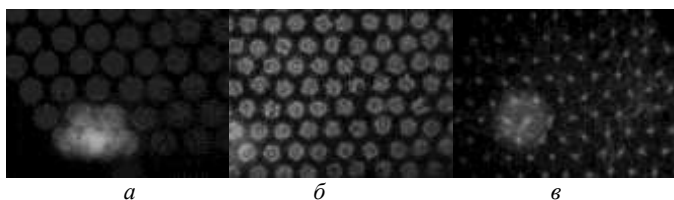


Рис. 1. Изображение маски: при помещении системы регистрации сразу за маской (а); при удалении системы регистрации на 5 м (б); при удалении на 25 м (в)

Установлены их физические ограничения, такие как нелинейный набег фазы за счет керровской самофокусировки и длина турбулентности.

#### *Список литературы*

1. Chateaufeuf M., et al. // Appl. Phys. Letters. 2008. 92. 091104.
2. Dogariu A., et al. // Science. 2011. 331. P.442.

В.С. МАКИН, Р.С. МАКИН<sup>1</sup>

*Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения,  
Сосновый Бор, Ленинградская обл.*

*<sup>1</sup>Дмитровградский инженерно-технологический институт НИЯУ МИФИ,  
Ульяновская обл.*

## **ФИЛАМЕНТАЦИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПРОЗРАЧНЫХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ И ФОРМИРОВАНИЕ ОБЪЕМНЫХ РЕШЕТОК**

Предложена новая модель образования наноструктур в прозрачных конденсированных средах под действием импульсов излучения фемтосекундной длительности, подтвержденная экспериментальными данными для широкозонных полупроводников и диэлектриков.

V.S. MAKIN, R.S. MAKIN<sup>1</sup>

*Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor,  
Leningrad region*

*<sup>1</sup>Dimitrovgrad Engineering and Technological Institute NRNU MEPhI, Ulyanovsk region*

## **LASER RADIATION FILAMENTATION IN TRANSPARENT CONDENSED MEDIA AND VOLUME GRATINGS FORMATION**

Based on the analysis of theoretical and experimental results of quartz based glasses damage by polarized ultrafast laser radiation the conclusion is made about the universal polariton model adequacy.

Хорошо известно явление филаментации лазерного излучения фемтосекундной длительности в прозрачных конденсированных средах. При плотностях мощности излучения, достаточных для металлизации среды, образуется цилиндрический плазменный канал, концентрация неравновесных носителей в котором достаточна для выполнения условий возбуждения цилиндрических поверхностных плазмон-поляритонов (ЦПП). Интерференция ЦПП встречных направлений распространения (рис. 1а) приводит к формированию решетки наноструктур ( $\mathbf{g}$ ) с периодом (при азимутальном квантовом числе  $m=0$ ):  $d=\lambda/2\eta k=\lambda/2n\xi k$  и ориентацией  $\mathbf{g} \parallel \mathbf{k} \perp \mathbf{E}$ , где  $\mathbf{E}$  - вектор напряженности электрического поля лазерного излучения,  $\mathbf{k}$  - волновой вектор лазерного излучения,  $\eta$  - действительная часть показателя преломления границы раздела диэлектрик – плазменный слой,  $n$  - показатель преломления среды,  $\xi n=\eta$ ,  $\xi \geq 1$ ,  $k=\dots, 1/2, 1, 2, 4, \dots$



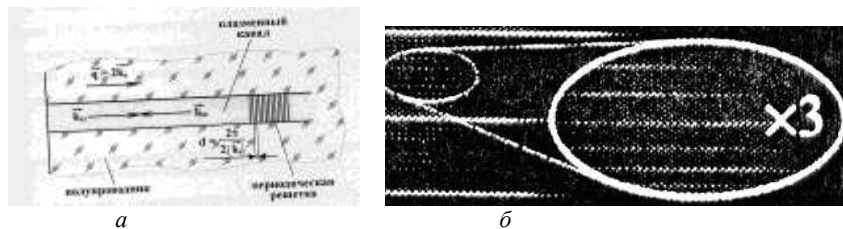


Рис. 1. Волновые вектора  $\vec{k}_{s1}$  и  $\vec{k}_{s2}$  встречных цилиндрических плазмон поляритонов, волноведомых каналом, сформированным в объеме прозрачной среды (серый цилиндр), и вектор решетки  $\vec{g}$ , образующейся в результате их интерференции. Условно показана периодическая решетка, являющаяся результатом интерференции и последующей записи структур (а); фрагмент изображения решетки  $\mathbf{g}$  (вертикальное направление) в LiF,  $\mathbf{g} \parallel \mathbf{k}, \mathbf{k}_s$  [2] (б)

В экспериментах по филаментации серии импульсов линейно поляризованного фс лазерного излучения ( $\lambda=800$  нм,  $\tau=120$  фс) в 4Н-SiC [1] обнаружено образование, в пределах филамента, наноструктур с  $d \approx 150$  нм для  $\lambda=800$  нм,  $n=2,65$ ,  $\eta \approx 1,1$ . Фиксация наноструктур связана с пространственным изменением показателя преломления 4Н-SiC (рис. 16).

В условиях острой фокусировки импульса фс излучения ( $\lambda=2600 \div 3350$  нм,  $\tau \approx 20$  фс) в [2] в кристаллическом LiF обнаружено образование решеток структур с периодом  $d \approx 2,2$  мкм и ориентацией, предсказанной моделью (при  $k=1/2, \lambda=3100$  нм,  $n=1,4$ ). Фиксация решеток осуществлялась путем пространственной модуляции концентрации центров окраски F – типа в LiF, что является новым механизмом записи решеток.

В непрямозонных полупроводниках GaP и Si при острой фокусировке сдвоенных импульсов фс лазерного излучения ( $\Delta t = 1$  пс) наблюдалось образование решеток [3, 4]. В объеме GaP это решетки с  $\lambda/2\eta \approx 230$  нм и ориентацией  $\mathbf{k} \perp \mathbf{g} \perp \mathbf{LE}$  и ортогональные им решетки с  $d = \lambda/k\xi \approx (80 \div 100)$  нм ( $\lambda=1,24$  мкм,  $n=3,1$ ,  $k=4$ ,  $\xi=n\zeta$ ,  $\zeta \approx 1,25$ ). В центральной части области воздействия в Si и GaP решетки не наблюдались, а только по краям этой области (аналогичный эффект наблюдался в кварцевом стекле [5]), что подтверждает предложенную модель с участием цилиндрических ПП.

#### Список литературы

1. Okada T., Tomita T., et al. // J. Appl. Phys. 2009. V.106. P. 154307.
2. Кузнецов А.В., Компанец В.О. и др. // Квантовая электроника. 2016. Т.46. №4. С.379-386.
3. Mori M., Shimotsuma Y., et al. // Phys. Status Solidi A. 2015. V.212. No 4. P.715-721.
4. Sei T., et al. // JLMN J. Laser Micro/Nanoengineering. 2016. V.11. No 1. P.76-80.
5. Blonsky I., et al. // Appl. Phys. B. 2009. V.97. No 4. P.829-834.

Д.А. НИКОЛАЕВ<sup>2</sup>, В.Б. ЦВЕТКОВ<sup>1,2</sup>, А.И. ШАМАТОВА<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ"  
<sup>2</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова, РАН, Москва

## ND:GGG ДИСКОВЫЙ ЛАЗЕР С ТРЁХПУЧКОВОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

Реализована трёхпучковая диодная накачка дискового активного элемента твердотельного лазера. Все области инверсной населённости активной среды были связаны между собой единым внеосевым многопроходовым внутрирезонаторным пучком. Лазер имел резонатор вырожденного типа с одним каналом вывода излучения.

D.A. NIKOLAEV<sup>2</sup>, V.B. TSVETKOV<sup>1,2</sup>, A.I. SHAMATOVA<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)  
<sup>2</sup>Prokhorov general physics institute of the RAS, Moscow

## ND:GGG DISK LASER WITH THREE-BEAM DIODE PUMPING

The three-beam optical pumping of active disk of the solid state laser was realized. All pumped inverse population areas of the active disk were connected by the single multipass off axis intracavity beam. The laser possessed degenerate resonator with single output channel of emission.

Одним из наиболее существенных факторов, препятствующих созданию мощных непрерывных твердотельных лазеров с высокими пространственными характеристиками, является термонаведенная в активном элементе линза. Использование тонких дисковых активных элементов (ДАЭ) позволило уменьшить влияние этого эффекта [1]. К дальнейшему снижению тепловой нагрузки на активный элемент может привести использование многопучковой оптической накачки [2, 3].

Целью работы являлись разработка и исследование параметров Nd:GGG дискового лазера с трехпучковой накачкой и вырожденным резонатором, имеющим единственный канал вывода излучения.

На рис. 1 представлена схема резонатора лазера. В качестве дискового активного элемента лазера использовался кристалл Nd:GGG размерами  $\varnothing 50$  мм x 1,5 мм и концентрацией ионов  $\text{Nd}^{3+} \approx 2 \cdot 10^{20}$  см<sup>-3</sup>. Резонатор лазера был образован плоским зеркалом М1, промежуточным зеркалом М2 и выходным сферическим зеркалом М3. Коэффициенты отражения зеркал М1 и М2 на длине волны 1062 нм были больше 99,5%. В качестве

выходного зеркала М3 использовались зеркала с коэффициентами отражения 98%, 94%, 88%, 85%, 80% и 75%. Суммарная мощность излучения накачки составляла 27 Вт. Работа велась в непрерывном и квазинепрерывном режимах накачки. В последнем случае использовался механический прерыватель накачки с частотой вращения диска 2,5 Гц. Длительность импульсов квазинепрерывной накачки составляла 40 мс.

Максимальный КПД лазера равный 35% (дифференциальный КПД — 44%) был достигнут в квазинепрерывном режиме при использовании зеркала с коэффициентом отражения равным 88%. Полный угол расходимости лазерного пучка по уровню 0,5 был равен около 2,9 мрад. Его значение практически не зависело ни от режима работы лазера, ни от коэффициента отражения выходного зеркала резонатора. Расчетное значение полного угла расходимости для одномодового пучка составляло 2,4 мрад. Таким образом, параметр  $M^2$  выходного пучка составлял примерно 1,2.

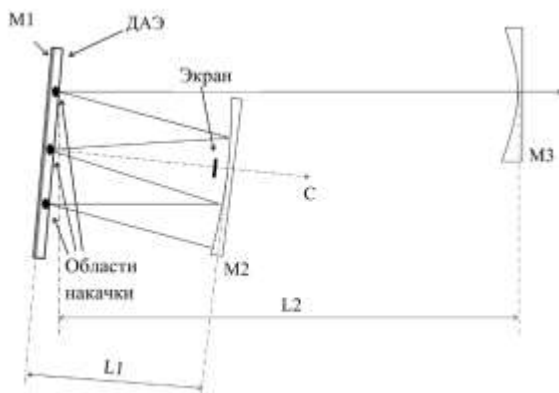


Рис. 1. Схема резонатора лазера

*Список литературы*

1. Giesen A., Hugel H., Voss A., Wittig K., Brauch U., OPOWER H. // Appl. Phys. B. 1994. V.58. P.365.
2. Гарнов С.В., Михайлов В.А., Серов Р.В., Смирнов В.А., Цветков В.Б., Щербаков И.А. // Квантовая электроника. 2007. Т.37. №10. С.910.
3. Николаев Д.А., Пивкина М.Н., Цветков В.Б. // Прикладная фотоника. 2015. Т.2. №1. С.44-52.

А.А. ИОНИН<sup>1</sup>, И.О. КИНЯЕВСКИЙ<sup>1</sup>, Ю.М. КЛИМАЧЕВ<sup>1</sup>,  
А.Ю. КОЗЛОВ<sup>1</sup>, А.А. КОТКОВ<sup>1</sup>, В.В. СТЕПАНИЩЕВ<sup>2</sup>,  
И.Ж. ХАФИЗОВ<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

## **СТРУКТУРА СПЕКТРА ГЕНЕРАЦИИ СУММАРНЫХ ЧАСТОТ НЕСЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРА НА ОКСИ УГЛЕРОДА В КРИСТАЛЛЕ ZnGeP<sub>2</sub>**

Впервые измерен спектр ГВГ и ГСЧ излучения неселективного СО-лазера в кристалле ZnGeP<sub>2</sub> со спектральным разрешением 0.05 нм, что позволило обнаружить тонкую структуру спектра преобразованного излучения.

A.A. IONIN<sup>1</sup>, I.O. KINYAEVSKIY<sup>1</sup>, Yu.M. KLIMACHYOV<sup>1</sup>,  
A.Yu. KOZLOV, A.A. KOTKOV<sup>1</sup>, V.V. STEPANISHCHEV<sup>2</sup>,  
I.Zh. KHAFIZOV<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

## **SPECTRAL STRUCTURE OF SUM FREQUENCY GENERATION OF MULTILINE CARBON MONOXYDE LASER IN ZnGeP<sub>2</sub> CRYSTAL**

For the first time spectrum of sum frequency generation of multiline carbon monoxide laser in ZnGeP<sub>2</sub> crystal was measured with resolution 0.05 nm, and a thin structure of frequency converted spectrum was found.

В работах [1-3] было показано, что при преобразовании частоты излучения лазера на окиси углерода (СО-лазера) в нелинейном кристалле ZnGeP<sub>2</sub> имеет место не критичный спектральный фазовый синхронизм. Это позволяет осуществить генерацию вторых гармоник (ГВГ) и суммарных частот (ГСЧ) множества спектральных линий неселективного СО-лазера при фиксированном положении кристалла. Более того, в работах [2, 3] было показано, что в кристалле ZnGeP<sub>2</sub> возможно широкополосное двухкаскадное преобразование частоты излучения неселективного СО-лазера. Ранее спектры излучения ГВГ и ГСЧ измерялись со спектральным разрешением ~0.3 нм [1] и 0.4 нм [2, 3]. В данной работе впервые проведено измерение спектров ГВГ и ГСЧ

излучения неселективного СО-лазера в кристалле  $ZnGeP_2$  со спектральным разрешением 0.05 нм.

Работа проводилась в Лаборатории Газовых лазеров ФИАН на установке, подробно описанной в [2, 3]. Спектр излучения СО-лазера насчитывал ~80 спектральных линий в интервале длин волн от 4.9 до 6.2 мкм с суммарной пиковой мощностью излучения ~ 2 кВт. Измеренный с разрешением 0.4 нм спектр излучения ГВГ и ГСЧ при угле фазового синхронизма кристалла  $ZnGeP_2$   $47.3^\circ$  (рис. 1а) насчитывал 97 спектральных линий, что согласуется с результатами, полученными в [1-3]. Однако измерение с более высоким спектральным разрешением показало, что линии ГВГ и ГСЧ имеют тонкую структуру. На рис. 1б представлена полоса линий ГВГ и ГСЧ вблизи длины волны 2.644 мкм, состоящая, по крайней мере, из 7 линий. С учетом тонкой структуры в полном спектре излучения ГВГ и ГСЧ неселективного СО-лазера было зарегистрировано более 587 линий.

Таким образом, экспериментально показано, что спектр излучения ГВГ и ГСЧ неселективного СО-лазера в кристалле  $ZnGeP_2$  значительно богаче, чем было определено ранее [1-3]. Спектр имеет тонкую структуру и представляет собой полосы близко расположенных спектральных линий.

Работа выполнена при поддержке грантов Президента РФ № МК-687.2017.2 и РФФИ № 15-02-08037.

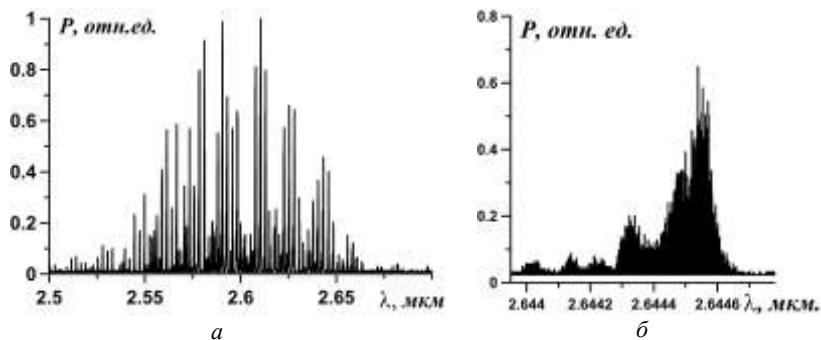


Рис. 1. Полный спектр ГВГ и ГСЧ (а)  
и часть спектра вблизи длины волны 2.644 мкм (б)

#### Список литературы

1. Андреев Ю.М., Бовдей С.Н. и др. // Оптика атмосферы. 1988. Т.1 (4). С.124-127.
2. Ionin A.A., Kinyaevskiy I.O. et. al. // OpticsLetters. 2012. V.37 (14). P.2838–2840.
3. Andreev Yu.M., Ionin A.A., et. al. // Quantum Electronics. 2013. V.43 (2). P.139–143.

М.Г. ГАЛУШКИН, В.П. ЯКУНИН, Р.Г. ДЬЯЧКОВ<sup>1</sup>

*Институт проблем лазерных и информационных технологий – филиал  
ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Шатура*

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

## **ВЛИЯНИЕ НАСЫЩЕНИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ДИОДНОЙ НАКАЧКИ В КРИСТАЛЛЕ YAG:Yb<sup>+3</sup> НА ПАРАМЕТРЫ ВОЛНОВОДНЫХ ПЛАНАРНЫХ ЛАЗЕРОВ**

Разработан метод расчёта энергетических параметров генерации планарных YAG:Yb<sup>+3</sup> лазеров с учётом насыщения поглощения излучения диодных лазеров накачки с длиной волны  $\lambda = 940$  нм. Показано, что нелинейность коэффициента поглощения накачки может существенно уменьшать коэффициент усиления слабого сигнала генерации на переходе с длиной волны  $\lambda = 1030$  нм. Установлено, что в поле интенсивного лазерного излучения значительно уменьшается влияние насыщения накачки на энергетическую эффективность планарных лазеров и усилителей мощности.

M.G. GALUSHKIN, V.P. YAKUNIN, R.G. DYACHKOV<sup>1</sup>

*Institute on Laser and Information Technologies – branch of FSRC*

*“Crystallography and Photonics” of the RAS, Shatura*

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

## **INFLUENCE OF SATURATION OF DIODE PUMP RADIATION ABSORPTION IN YAG:Yb<sup>+3</sup> CRYSTAL ON PARAMETERS OF PLANAR WAVEGUIDE LASERS**

A method has been devised for calculating the energy parameters of generation of planar YAG:Yb<sup>+3</sup> lasers, with regard to saturation of the absorption of pump diode laser radiation with a wavelength  $\lambda = 940$  nm. It has been shown that nonlinearity of the pump absorption coefficient can substantially reduce the small-signal gain at the transition with a wavelength  $\lambda = 1030$  nm. It has been found that pump saturation influence on the energy efficiency of planar lasers and power amplifiers is considerably weakened in the field of intense laser radiation.

Кристаллы граната, активированные иттербием, широко используются в качестве активной среды лазеров с диодной накачкой, например в мощных технологических волоконных [1] и дисковых. В последнее время ведутся разработки планарных волноводных YAG:Yb лазеров высокой мощности с гибридным резонатором [2]. Активный элемент этих лазеров

обладает свойством просветляться для интенсивного излучения диодных лазеров.

Целью работы является теоретическое исследование нелинейности поглощения излучения диодных лазеров в планарных YAG:Yb лазерах и разработка моделей, описывающих влияние насыщения накачки на их энергетические параметры.

В рамках известной модели кинетики активной среды получены соотношения, описывающие взаимную связь между коэффициентом поглощения на единицу длины  $\beta$  излучения накачки и коэффициентом усиления лазерного излучения  $\alpha$

$$\beta = \beta_0 - j_s (\alpha + \alpha_{abs}) / j_{ps}, \quad (1)$$

где  $\beta_0$  - коэффициент поглощения для малой интенсивности накачки, когда нет насыщения,  $j_s$ ,  $j_{p,s}$  - интенсивности насыщения лазерного излучения и накачки соответственно,  $\alpha_{abs}$  - величина коэффициента поглощения в кристалле с иттербием излучения на лазерной частоте в отсутствие накачки. В режиме стационарной генерации коэффициент усиления равен постоянной известной пороговой величине. Поэтому из (1) находится насыщенный коэффициент поглощения, что позволяет определять энергетические параметры планарного лазера с учётом насыщения накачки. Сравнение расчётных данных с экспериментальными, полученными в [2], показало хорошее согласование между ними. Насыщение накачки наиболее сильно ослабляет коэффициент усиления слабого сигнала. Однако в поле интенсивного лазерного излучения влияние поглощения излучения диодных лазеров на энергетические параметры YAG:Yb лазера значительно ослабевает. По этой причине измеренные зависимости коэффициента усиления слабого сигнала от мощности накачки не отражают в полной мере энергетические возможности самого YAG:Yb лазера, но позволяют определить важные параметры  $\alpha_{abs}$ ,  $j_s$  и интенсивность насыщения накачки,

#### *Список литературы*

1. Курков А.С., Дианов Е.М. // Квантовая электроника. 2004. Т.34. №10. С.881-900.
2. Thomson I.J., Fernando M.J.F., et. al. // IEEE J. of quantum electronics. 2011. V.47 (10). P.1336-1344.

К.И. КОЗЛОВСКИЙ, Г.Е. КОТКОВСКИЙ, Ю.А. МИТЯГИН<sup>1</sup>,  
И.Н. ПИРЯЗЕВ, А.А. ПЛЕХАНОВ, А.А. ЧИСТЯКОВ

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

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

## **СТЕНД НА ОСНОВЕ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА И ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАЙКЕЛЬСОНА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ФОТОПРОВОДЯЩИХ АНТЕНН**

Получен спектр терагерцового (ТГц) излучения фотопроводящей антенны при помощи стенда, разработанного на основе фемтосекундного лазера и интерферометра Майкельсона. Экспериментальные данные были сопоставлены со спектром излучения рассматриваемой антенны, полученным ранее другими коллективами методом терагерцовой спектроскопии во временной области.

K.I. KOZLOVSKII, G.E. KOTKOVSKII, Yu.A. MITYAGIN<sup>1</sup>,  
I.N. PIRYAZEV, A.A. PLEKHANOV, A.A. CHISTYAKOV

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

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

## **STAND ON THE BASIS OF FEMTOSECOND LASER AND A MICHELSON INTERFEROMETER FOR THE STUDY OF THz RADIATION OF PHOTOCONDUCTIVE ANTENNAS**

The spectrum of THz photoconductive antenna radiation was obtained with the stand that has been designed based on the femtosecond laser and a Michelson interferometer. The experimental data were compared with the spectrum of the antenna's radiation, which has been obtained previously by other teams by terahertz time-domain spectroscopy.

ТГц-излучение безвредно для человека, и в этой области находятся спектры многих сложных органических молекул. Одним из основных источников данного излучения является фотопроводящая антенна (ФПА).

Распространенным методом определения спектра излучения ФПА является ТГц-спектроскопия во временной области (Terahertz Time-Domain Spectroscopy, THz TDS). На рис. 1 [1] показана общая схема установки, с помощью которой определяется спектр излучения исследуемой ФПА (рис. 2) [1] данным методом.



Нами разработан стенд [2] (рис. 3), который позволяет получать спектр ТГц-излучения. Фемтосекундный лазер воздействует на ФПА, что приводит к генерации ТГц-излучения, которое разлагается на спектр при помощи Фурье-спектрометра на основе интерферометра Майкельсона, затем оно регистрируется пироэлектрическим детектором. При замене детектора на ТГц-камеру возможно получение 2D-изображений объектов с регистрацией спектра ТГц-излучения прошедшего и отраженного от этих объектов. При помощи данного стенда получен спектр излучения исследуемой ФПА (рис. 4).

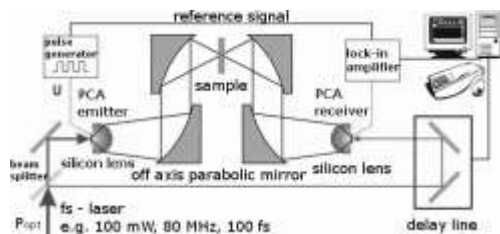


Рис. 1. Схема установки, используемой в методе THz TDS [1]

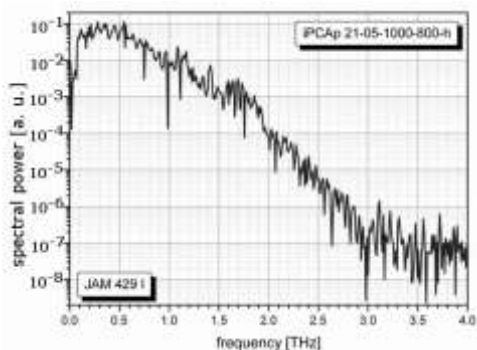


Рис. 2. Спектр излучения ФПА, полученный методом THz TDS [1]

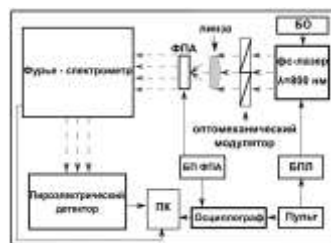


Рис. 3. Схема разработанного стенда: БО - блок охлаждения; БПЛ – блок питания лазера, БП ФПА – блок питания ФПА

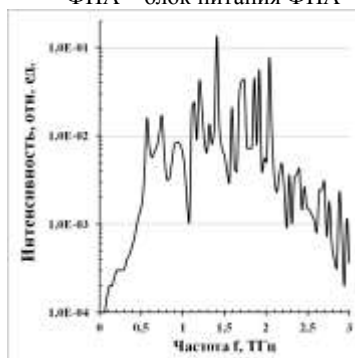


Рис. 4. Спектр излучения ФПА, полученный при помощи разработанного стенда

#### Список литературы

1. BATOR GmbH, Instruction manual and data sheet iPCA-21-05-1000-800-h.
2. Chistyakov A.A., Kozlovskii K.I., Kotkovskii G.E., Kuzishchin Yu.A., Krivenkov V.A., Mityagin Yu.A., Piryazev I.N. // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V.737. P.012020.

А.Э. АКМАЛОВ, К.И. КОЗЛОВСКИЙ, Г.Е. КОТКОВСКИЙ,  
И.Н. ПИРЯЗЕВ, А.А. ПЛЕХАНОВ, А.А. ЧИСТЯКОВ

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **ТГц-СПЕКТР НА ОСНОВЕ ФОТОПРОВОДЯЩИХ АНТЕНН И ПОЛОСОВЫХ РЕЗОНАНСНЫХ ТГц-ФИЛЬТРОВ**

В работе экспериментально определены ТГц-спектр фотопроводящей антенны и спектры пропускания различных диэлектрических материалов. При этом использовались фемтосекундный лазер, фотопроводящие антенны фирмы Bator и полосовые ТГц-фильтры фирмы ТИДЕКС. Проводилось сравнение полученных спектров с результатами определения ТГц-спектров с помощью интерферометра Майкельсона.

A.E. AKMALOV, K.I. KOZLOVSKII, G.E. KOTKOVSKII,  
I.N. PIRYAZEV, A.A. PLEKHANOV, A.A. CHISTYAKOV

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

## **THz SPECTRUM BASED ON PHOTOCONDUCTIVE ANTENNAS AND BAND RESONANT THz FILTERS**

THz photoconductive antenna spectrum and transmission spectra of various dielectric materials have been determined experimentally in present work. We used femtosecond laser, photoconductive antenna of the company Bator and THz band pass filters of the company Tydex. A comparison of the obtained spectra with the results of determination THz spectra with a Michelson interferometer has been done.

В настоящее время активно осваивается терагерцовый (ТГц) диапазон электромагнитного излучения, в то же время происходит внедрение методов и приборов на основе ТГц-излучения в смежные области науки, в технику и медицину. Исследования и разработки в этом направлении требуют создания специальной спектральной аппаратуры.

Нами создан спектрометр ТГц-излучения на основе фотопроводящих антенн (ФПА) [1] и резонансных фильтров ТГц-диапазона. Использование ТГц-фильтров обладает большим преимуществом, поскольку вносит минимальные потери в излучение, а также не требует формирования специальной оптической системы. Особенно важно, что использование фильтров позволяет создавать эффективные системы ТГц-радиовидения со спектральным разрешением.

На рис.1 представлена общая схема спектрометра. В работе исследовался спектр генерации фотопроводящих антенн, а также проводилось сравнение приведенных результатов с результатами, полученными с применением фурье-спектрометра и time-domain – метода регистрации спектров ТГц-излучения (рис. 2).

Исследовались также спектры пропускания различных диэлектриков – фторопласта, оргстекла, полипропилена (рис. 3).

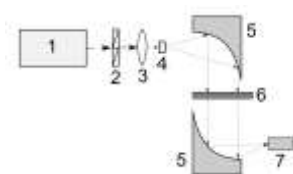


Рис. 1. Общая схема спектрометра:  
1 – фемтосекундный лазер,  
2 – оптомеханический модулятор,  
3 – линза, 4 – ФПА,  
5 – параболическое зеркало,  
6 – исследуемый образец,  
7 – пирозлектрический детектор

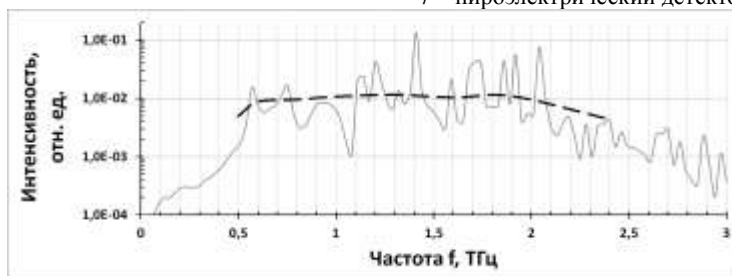


Рис. 2. Спектры излучения ФПА: пунктирная линия – спектр, полученный при помощи созданного спектрометра, сплошная линия – спектр, полученный при помощи стенда на основе фемтосекундного лазера и интерферометра Майкельсона

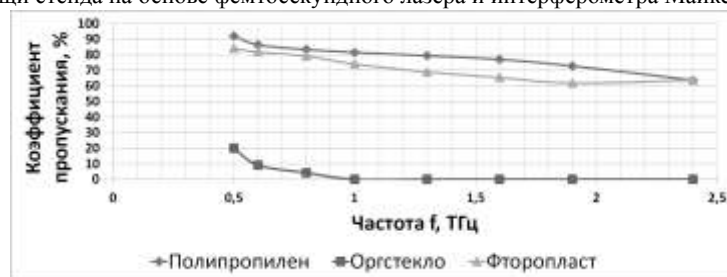


Рис. 3. Графики зависимости коэффициента пропускания материалов от частоты падающего излучения, полученные при помощи созданного спектрометра

#### Список литературы

1. Chistyakov A.A., Kozlovskii K.I., Kotkovskii G.E., Kuzishchin Yu.A., Krivenkov V.A., Mityagin Yu.A., Piryazev I.N. // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V.737. P.012020.

Д.В. ГАНИН<sup>1,2</sup>, К.Э. ЛАПШИН<sup>2</sup>, А.З. ОБИДИН<sup>2</sup>,  
С.К. ВАРТАПЕТОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

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

## **ОДНОИМПУЛЬСНОЕ ПЕРФОРИРОВАНИЕ ТОНКИХ ПРОЗРАЧНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ С ПОМОЩЬЮ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРОВ**

Представлены результаты экспериментов по формированию протяженных (> 100 мкм) лазерных филаментов в объеме прозрачных материалов с помощью одиночных фемтосекундных лазерных импульсов. Успешно проведены эксперименты по одноимпульсному перфорированию полипропиленовой пленки толщиной 50 мкм. Диаметр сквозных отверстий составил 5 мкм.

D.V. GANIN<sup>1,2</sup>, K.E. LAPSHIN<sup>2</sup>, A.Z. OBIDIN<sup>2</sup>,  
S.K. VARTAPETOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National research nuclear university MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

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

## **SINGLE PULSE PERFORATING OF THIN TRANSPARENT DIELECTRICS BY FEMTOSECOND LASERS**

Presents the result of experiments on the formation of elongated (>100 um) laser filaments in the bulk of transparent material by single femtosecond laser pulse. Carried out experiments on single-pulse perforating of 100 um polypropylene film. The diameter of the through holes was 5 um.

Фемтосекундные лазеры предоставляют отличные возможности для прецизионной обработки материалов. Однако при наличии сферических aberrаций или при нелинейных эффектах, форма внутренних микромодификаций может сильно отличаться от сферы и иметь вид нитей, форма и размеры которых зависят от параметров ФС лазера, образца и условий эксперимента [1-3]. Причинами этого могут являться самофокусировка [3], пространственная модуляция пучка [4] и другие [5]. Исследование процессов взаимодействия излучения ФС лазеров с объемными диэлектриками и возможности формирования протяженной перетяжки в веществе привело к разработке метода, позволяющего создавать высококачественные и высокоаспектные цилиндрические отверстия в прозрачных пленках. Подобные перфорированные пленки

могут использоваться как различные фильтры, служить защитным (стерилизующим) упаковочным материалом с газопроницаемым барьером в пищевой, медицинской промышленности, а также в качестве деталей высокотехнологичных устройств.

Использование продольной интерфейсной сферической аберрации, возникающей на границе двух сред, позволяет формировать пятна фокусировки диаметром менее 2 мкм, а также удлинить область максимальной концентрации энергии, которая может значительно (в десятки раз) превосходить длину фокальной перетяжки, образующейся в воздухе. Применительно к микрообработке прозрачных диэлектриков можно сказать, что образуется «виртуальное сверло» (VD - virtual drill) позволяющее создавать за один импульс полости цилиндрической формы с высокими аспектными соотношениями.

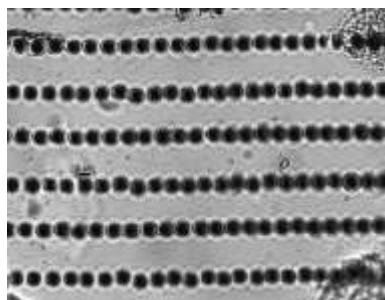


Рис. 1. Микрофотография отверстий, полученных при сканировании полипропиленовой пленки в режиме один ФС импульс - одно отверстие, толщина пленки 50 мкм,  $F=100$  Гц,  $E_{имп}=5$  мкДж,  $V_{ск}=100$  мкм/сек

При размещении такого VD внутри прозрачного вещества и при плотности энергии, превышающей порог разрушения, происходит создание цилиндрической полости (рис. 1). Сформировать такое VD в тонкой пленке непосредственно не представляется возможным из-за малой толщины, поэтому для создания сквозного пробоя в пленке необходимо ее размещение за тыльной поверхностью пластины из прозрачного диэлектрика с толщиной достаточной для образования длинного VD превышающего толщину пленки.

Работа поддержана грантом «УМНИК» фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере 10624ГУ/2016.

#### *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. // Quantum Electronics. 2015. V.45 (11). P.1029.
3. Couairon A., Sudrie L., et al. // Phys. Rev. B. 2005. V.71. P.125435.
4. Dergachev A.A., et. al. // Laser Phys. Lett. 2015. V.12.
5. Ganin D.V., Obidin A.Z., et. al // JPCS. 2016. V.743 (1). P. 012023.

А.А. АКОВАНЦЕВА, В.И. ЮСУПОВ, А.О. РЫБАЛТОВСКИЙ<sup>1</sup>  
*Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,  
Троицк*

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

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУР  
ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕПРЕРЫВНОГО И ИМПУЛЬСНОГО  
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПЛЕНКАХ  
ТЕРМОСТАБИЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ**

Приведены результаты экспериментов по формированию люминесцентных лазерно-индуцированных структур в матрице термостабильного полибензимидазола под действием непрерывного и импульсного излучения. Рассмотрен механизм люминесценции полученных структур. Показано влияние на люминесценцию сформированных структур таких факторов, как температура и наличие растворителя.

А.А. AKOVANTSEVA, V.I. YUSUPOV, A.O. RYBALTOIVSKIИ<sup>1</sup>  
*Institute of Photonic Technologies, – branch of FSRC “Crystallography and Photonics”  
of the RAS, Troitsk*

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

**FEATURES OF FORMATION OF STRUCTURES  
UNDER THE INFLUENCE OF CONTINUOUS  
AND PULSED LASER RADIATION IN THE FILMS  
OF THERMOSTABLE POLYMERS**

Presents the result of experiments on the formation of laser-induced luminescent structures in the thermostable polymer formed under the influence of continuous and pulsed radiation. The mechanism of luminescence of the structures is obtained. Shows the effect on the structure luminescence of such factors as temperature and the solvent presence.

В настоящее время лазерно-индуцированное формирование устойчивых люминесцентных структур в твердых прозрачных материалах проводится после введения редкоземельных ионов [1] или полупроводниковых наночастиц [2] с дальнейшим их осаждением. Подобные структуры применяются в ряде электронных и сенсорных устройств [3], а также в некоторых биомедицинских технологиях [4]. Лазерно-индуцированное формирование люминесцирующих структур в

беспримесных материалах не столь распространено. Выбор в качестве полимерных матриц термостабильных полибензимидазолов, разрушающихся при температурах выше 500°C, дал возможность варьировать мощность лазерного излучения в широком диапазоне и проводить температурную обработку сформированных структур до 250°C. Подобные структуры в дальнейшем могут найти применение для создания сенсорных устройств, в узлах и деталях аппаратов, подвергающихся повышенным температурам и нагрузкам, а также в дефектоскопии.

Целью данной работы явилось формирование в пленках термостабильных полибензимидазолов линейных люминесцентных структур методом импульсного и непрерывного облучения.

Для формирования структур использовался лазер с непрерывным излучением с длиной волны 512 нм и фемтосекундный лазер с длиной волны 532 нм. В зависимости от типа излучения были получены структуры с различной морфологией поверхности и разными люминесцентными свойствами. Структуры, сформированные под непрерывным излучением, имели более сильную люминесценцию, однако их размеры доходили 70-80 микрон в отличие от структур, сформированных фемтосекундным лазером, где размеры составили 1-2 мкм.

Показано влияние на люминесценцию и морфологию полученных структур наличия в пленках растворителя. Люминесценция возникает за счет пространственных конформаций в следствие  $\pi$ - $\pi^*$  переходов в бензимидазольных фрагментах полимера при поглощении энергии, что подтверждено квантово-механическими расчетами. Однако, такие конформации в жесткоцепных полимерах гораздо более легко осуществимы в присутствии минимальных концентраций растворителя, уменьшающих плотность полимера.

Проведен эксперимент температурного отжига полученных структур. Показано, что люминесценция и шероховатость структур, сформированных под воздействием непрерывного излучения, уменьшается в отличие от люминесценции структур, сформированных под действием импульсного лазерного излучения, на которые отжиг практически не влияет.

#### *Список литературы*

1. Гапоненко Н.В. Плёнки, сформированные золь-гель методом на полупроводниках и в мезопористых матрицах. Минск: Бел-наука. 2003.
2. Dirr S., Wiese S., et al. // Synthetic metals. 1999. V.91(1-3). P.53.
3. Lin C.-A.J., Lee C.-H., et al // J.of Med. and Biolog. Eng. 2009 V.29. P. 276.
4. Boraban A.P., Dmitriev V.A., et al // Rus. Phys. J. 2014. V.57 (5). P.627.

В.В. СМИРНОВ, О.М. АЛЫКОВА,  
Е.И. БЕЗНИСКО, К.В. КУРАМШИН  
*Астраханский государственный университет*

## **ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА И ПАРАМЕТРОВ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ФЕРРИТ-ГРАНАТОВ ПОД ЗАДАЧИ ПРИКЛАДНОЙ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ**

Приведены модельные расчеты намагниченности насыщения монокристаллических пленок феррит-гранатов сложного состава. Полученные результаты дают значительный разброс с имеющимися экспериментальными данными, на основании анализа данных расхождений в расчетные формулы введены эмпирические коэффициенты, связанные с видом редкоземельных элементов, входящих в структурную формулу и их массовой доли.

V.V. SMIRNOV, O.M. ALYKOVA,  
E.I. BEZNISKO, K.V. KURAMSHIN  
*Astrakhan State University*

## **OPTIMIZATION OF THE STRUCTURE AND PARAMETERS OF MONOCRYSTAL FILMS OF FERRITE-GARNETS UNDER THE CHALLENGES OF APPLIED OPTOELECTRONICS**

Presents model calculations of the saturation magnetization of monocrystalline films of ferrite-garnets of complex composition. These results provide considerable variation with the available experimental data, based on an analysis of these discrepancies in the formulas introduced empirical coefficients associated with the views of the rare earth elements contained in the structural formula and mass fraction.

Монокристаллические пленки феррит-гранатов (МПФГ) являются прекрасной средой пригодной как для фундаментальных исследований, так и для прикладного использования [1]. В частности, они находят широкое применение в магнитооптике для изготовления управляемых транспарантов, модуляторов и т.д. МПФГ характеризуются набором ряда параметров таких как коэффициент поглощения  $\alpha$ , удельное фарадеевское вращение  $\varphi_F$ , толщина  $h$ , характеристическая длина  $l$ , намагниченность насыщения  $4\pi M_s$ , энергия доменной стенки  $\sigma_u$ , константа одноосной анизотропии  $K_u$ , температура Нееля  $T_N$ , коэрцитивная сила  $H_c$ , фактор качества материала  $q$ , обменная константа  $A$ , подвижность доменных



стенок  $\mu$ . [2-4]. Значение параметров определяется составом пленки. Существующая теория [5] позволяет по трем известным параметрам рассчитать остальные.

Изготовление пленок является весьма дорогостоящим процессом, поэтому существует необходимость прогнозировать свойства МПФГ в зависимости от их состава. Целью работы является теоретический расчет параметров пленки в зависимости от их состава и соотнесение полученных результатов с имеющимися экспериментальными данными. В качестве расчетного параметра выбрана намагниченность насыщения. Теоретической базой расчетов является развитая теория Нееля [4].

Намагниченность насыщения  $M_c(T)$  МПФГ, являющаяся ферримагнетиком, и имеющих три подрешетки определяется (с учетом температурной зависимости) определяется решением единственного уравнения [4]:

$$M_c = \frac{C_c}{T} (v_{ac}M_a + v_{cd}M_d + v_{cc}M_c),$$

где  $C_c$  – отнесенная к единице объема константа Кюри иона;  $T$  – температура;  $v_{ac}$ ,  $v_{ad}$ ,  $v_{cc}$  – эффективные константы молекулярного поля, определяющие суммарное взаимодействие между  $c$ -ионами и ионами  $Fe^{3+}$ ,  $M_a$ ,  $M_d$ ,  $M_c$  – спонтанные намагниченности.

Однако полученные значения намагниченности сложных феррит-гранатовых систем заметно отличаются от найденных экспериментально.

На основе анализа большого числа экспериментальных данных [3] в используемые расчетные формулы были введены эмпирические коэффициенты для приведения в соответствие теоретических расчетов и экспериментальных значений параметров МПФГ.

На данный момент полученные соотношения находятся в стадии проверки.

#### *Список литературы*

1. Балбашов А.М., Лисовский Ф.В., Раев В.К. и др. Элементы и устройства на цилиндрических магнитных доменах: Справочник. М.: Радио и связь, 1987.
2. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. М.: 1987.
3. Эшенфельдер А. Физика и техника цилиндрических магнитных доменов. М.: Мир, 1983.
4. Малоземов А., Слонзуски Дж. Доменные стенки в материалах с цилиндрическими магнитными доменами. М.: Мир, 1982.
5. Крупичка С. Физика ферритов. М., Мир, 1976. Ч.1.

Ю.А. ПОЛТАЕВ, М.М. СЕРГЕЕВ, Р.А. ЗАКОЛДАЕВ,  
В.В. КОВАЛЬ

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **ФЕМТОСЕКУНДНАЯ ЗАПИСЬ ВОЛНОВОДОВ В ОБЪЕМЕ ПОРИСТОГО СИЛИКАТНОГО СТЕКЛА**

Представлены различные методики исследования особенностей локальных областей модификации структуры пористых стекол (ПС) в виде волноводов. Изучены такие оптические характеристики как числовая апертура, оптические потери и различие в показателях преломления  $dn$ .

Yu.A. POLTAEV, M.M. SERGEEV, R.A. ZAKOLDAEV,  
V.V. KOVAL

*ITMO University, Saint-Petersburg*

## **DENSIFICATION INSIDE OF POROUS GLASS BY ULTRA-SHORT LASER PULSES**

We present different researching techniques of local areas modification in structure of porous glass (PG) in the form of waveguides. Such optical characteristics as numerical aperture, optical losses and  $dn$  were studied.

Для локальной модификации структуры в объеме стекла широко применяется фемтосекундное излучение, в том числе для записи волноводов. При этом увеличение различия в показателе преломления между областью модификации и материалом стекла является одним из способов уменьшения оптических потерь. Одним из способов достижения высоких значений  $dn$  становится легирование стекла наночастицами и атомами различных металлов [1]. Однако, это приводит к усложнению процесса изготовления таких стекол и ухудшению их оптических свойств.

Одним из эффективных решений стало использование пористого стекла (ПС), обладающего высокой адсорбционной способностью за счет разветвленной структуры материала. При этом ПС обладает оптическими свойствами и составом, близкими к кварцевому стеклу. Уплотнение кремнеземного каркаса при тепловом, либо лазерном воздействии позволяет изменять значение показателя преломления с 1.34 до 1.46 (т.е. на 8.9%) [2]. С помощью фемтосекундной обработки была реализована локальная запись областей модификации протяженной формы,

расположенных в объеме ПС с размерами поперечного сечения от 3 до 12 мкм [3].

Целью настоящей работы является исследование особенностей локальных областей модификации структуры ПС в виде волноводов, а также определение их оптических свойств.

Локальные области модификации формировались под действием фемтосекундных импульсов, сфокусированных микрообъективом с  $\times 10$ ,  $NA=0.25$  и  $\times 20$ ,  $NA=0.4$  в объеме чистых, а также пропитанных различными жидкостями (вода, родамин 6G и родамин В) плоскопараллельных пластин ПС системы  $0.2Na_2O-4.2B_2O_3-95.5SiO_2-0.1Al_2O_3$ . В качестве источника излучения использовалась вторая гармоника иттербиевого волоконного лазера Satsuma ( $\lambda = 515$  нм;  $\tau = 300$  фс;  $\nu = 500$  кГц).

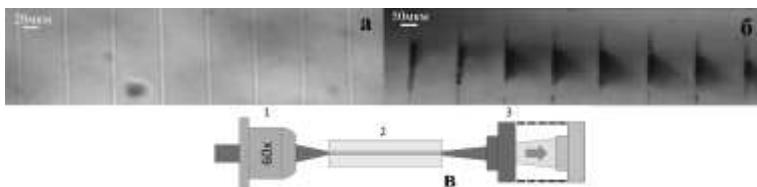


Рис. 1. Микрооптические фотографии волноводных структур: сверху (а), с торца (б), схема измерения угловой расходимости лазерного пучка: 1 - микрообъектив, 2 - образец, 3 - приемник измеряющий диаметр (в)

В ходе данной работы были оценены: числовая апертура, оптические потери и  $dn$ . Расходимость лазерного пучка на длине волны  $\lambda = 405$  нм, введенного в волноводную структуру с сечением эллипсоидной формы (размер полуосей 2 и 7 мкм), определялась по изменению диаметра пучка на фиксированных расстояниях от выходного торца волновода. Для определения  $dn$  использовались различные способы измерений, в том числе поляризационная оптическая микроскопия.

#### Список литературы

1. Veiko V.P., Sergeev M.M., Kostyuk G.S. // Journal of Laser Micro Nanoengineering. 2015. V.10(1). P.20-23.
2. Veiko V.P., Jakovlev E.B., Chuiko V.A. Laser methods of control porous silica glasses structure // Chemical Processing of Advanced Materials. 1992. P.919-931.
3. Veiko V.P., Zakoldaev R.A., Sergeev M.M., Kudryashov S.I., Poltaev Yu.A. Densification inside of porous glass by ultra-short laser pulses // Proceedings of LPM2016. 2016.

В.В. КОВАЛЬ, М.М. СЕРГЕЕВ, Р.А. ЗАКОЛДАЕВ,  
В.С. РЫМКЕВИЧ, Ю.А. ПОЛТАЕВ  
*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **ИЗГОТОВЛЕНИЕ ФАЗОВЫХ РЕШЕТОК ЛАЗЕРНОЙ МИКРОПЛАЗМОЙ ДЛЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ СХЕМ МИКРООБРАБОТКИ**

Представлен метод изготовления фазовых решеток на поверхности плавленого кварца при помощи лазерной микроплазмы. Потенциальное применение таких оптических элементов – делители пучка. Поэтому они были использованы в интерференционной схеме для обработки тонких металлических пленок.

V.V. KOVAL, M.M. SERGEEV, R.A. ZAKOLDAEV,  
V.S. RYMKEVICH, Yu.A. POLTAEV  
*ITMO University, Saint-Petersburg*

## **FABRICATION OF PHASE GRATINGS BY LASER MICROPLASMA FOR INTERFERENCE SCHEMES OF MICROMACHINING**

We present the method of phase gratings formation on the fused silica surfaces by laser microplasma. The potential application of such optical elements is a beam splitting. Thus, they have been used in the interference scheme for processing of the thin metal films.

В настоящее время в лазерной микрообработке материалов активно используются методы, основанные на регистрации интерференционной картины нескольких пучков в плоскости записи. Применение микрообработки, основанной на интерференции нескольких лазерных пучков, позволяет осуществлять формирование как одномерных, так двух- и трехмерных структур субмикронного размера [1].

Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) способны осуществлять деление исходного светового пучка на несколько пучков, интенсивность каждого из которых может быть заранее рассчитана. В частности, для фазовых ДОЭ свойственны высокая дифракционная эффективность и низкие оптические потери, что делает их крайне перспективными в схемах лазерной микрообработки.

Частным случаем ДОЭ являются фазовые решетки (ФР), представляющие собой одномерный периодический микрорельеф поверхности материала прозрачного для падающего излучения. Изменяя и корректируя параметры микрорельефа ФР, можно добиться управления соотношением энергии между дифрагировавшими пучками.

Целью настоящей работы является формирование субмикронных структур на поверхности металлических пленок с использованием ФР, изготовленных методом лазерно-индуцированной обработки микроплазмой [2], в многолучевой интерференционной схеме.

В настоящей работе использовались ФР с синусоидальным профилем (рис. 1а) со следующими характеристиками: период  $p = 100$  мкм, дифракционная эффективность  $\pm 1$  порядка  $\sim 58\%$  для длины волны 1064/532/355 нм. Формирование интерференционной картины осуществлялось в конфокальной схеме (рис. 1б). Лазерный пучок ( $\lambda = 1064/532/355$  нм,  $\tau = 25$  пс), проходя через ФР 1 и линзу 2, делился на несколько порядков равной интенсивности. Пространственный фильтр 3 отсекал нулевой и высшие порядки меньшей интенсивности. Далее прошедшие пучки сводились в фокальной плоскости микрообъектива 4, где формировалось поле интерференционной картины и находилась структурируемая пленка 5. В результате обработки тонких металлических пленок в интерференционном поле были получены структуры, представляющие собой набор линий с периодом  $\sim 0.5 - 1.5$  мкм (рис. 1в).

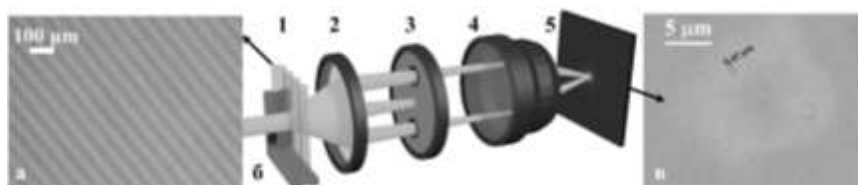


Рис. 1. Фотография ФР (а), схема экспериментальной установки (б), фотография результата обработки тонкой металлической пленки (в)

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ, соглашение № 14-12-00351.

#### Список литературы

1. Kondo T., Matsuo S., Juodkazis S., Mizeikis V., Misawa H. Multiphoton fabrication of periodic structures by multibeam interference of femtosecond pulses // Applied Physics Letters. 2003. V.82. No 17. P.2758-2760.
2. Kostyuk G.S., Zakoldaev R.A., Sergeev M.M., Veiko V.P. Laser-induced glass surface structuring by LIBBH technology // Optical and Quantum Electronics. 2016. V.48. No 4. P.1-8.

Х. БАЗЗАЛ, А.Р. ФАДАИЯН, Е.С. ВОРОПАЙ, А.П. ЗАЖОГИН  
*Белорусский государственный университет, Минск*

**ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ НИТРИДА  
АЛЮМИНИЯ В ПЛАЗМЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УГЛА  
ПАДЕНИЯ СДВОЕННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ  
НА АЛЮМИНИЕВЫЙ СПЛАВ Д16Т  
В АТМОСФЕРЕ ВОЗДУХА**

Исследованы процессы образования нитрида алюминия при воздействии сфокусированных сдвоенных лазерных импульсов под различными углами на поверхность мишени из алюминиевого сплава Д16Т в атмосфере воздуха. Показана возможность увеличения как доли ионов алюминия различной зарядности в приповерхностной лазерной плазме в режимах абляции, так и нанокластеров AlN и AlO при последовательном воздействии серии сдвоенных импульсов на мишень под углом падения  $\approx 75^\circ$ .

Kh. BAZZAL, A.R. FADAIJAN, E.S. VOROPAY, A.P. ZAJOGIN  
*Belarusian State University, Minsk*

**INVESTIGATION INTO THE FORMATION PROCESSES  
OF ALUMINUM NITRIDE IN THE PLASMA  
DEPENDING ON THE INCIDENCE ANGLE  
OF DOUBLE LASER PULSES ONTO THE TARGET  
OF D16T ALUMINUM ALLOY IN THE AIR**

The formation processes of aluminum nitride under the effect of focused double laser pulses incident at different angles on the surface of the target of D16T aluminum alloy in the air have been analyzed. It has been demonstrated that there is a possibility to increase both the numbers of aluminum ions with different charges in the surface laser plasma in the ablation mode and of AlN and AlO nanoclusters when a series of double pulses sequentially heat the target at the incidence angle about  $75^\circ$ .

Анализ и целенаправленное изменение компонентного, зарядового и энергетического распределения состава лазерного факела возможно на основе дополнительного воздействия на первичную плазму дополнительного лазерного импульса.

Цель работы состояла в том, чтобы показать возможность и определить условия для получения методом абляции сериями сдвоенных лазерных импульсов алюминиевых мишеней в воздушной атмосфере

нанокластеров AlN для использования в технологиях получения нанокристаллов и напыления тонких пленок.

Для проведения исследований использовался лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1 (изготовитель СП «ЛОТИС ТИИ»). Лазерное излучение фокусировалось на образец с помощью ахроматического конденсора с фокусным расстоянием 104 мм. Размер сфокусированного пятна примерно 50 мкм. Динамика образования радикала AlN изучена нами по эмиссионным спектрам этой молекулы (508,05 нм) при воздействии серии одиночных и сдвоенных лазерных импульсов на алюминиевую мишень в атмосфере воздуха.

При использовании серий одиночных импульсов даже с удвоенной энергией импульсов (интервал между импульсами 0 мкс) образования AlN и AlO практически не наблюдается. С использованием интервала между импульсами 10 мкс нами проведено исследование процесса образования AlN от энергии импульсов в зависимости от угла. На рис. 1 приведены зависимости изменения интенсивности полос AlN, AlO и линий ионов N II, Al II и Al III от величины угла падения лазерного излучения на мишень для энергий импульсов излучения 40 мДж и 54 мДж.

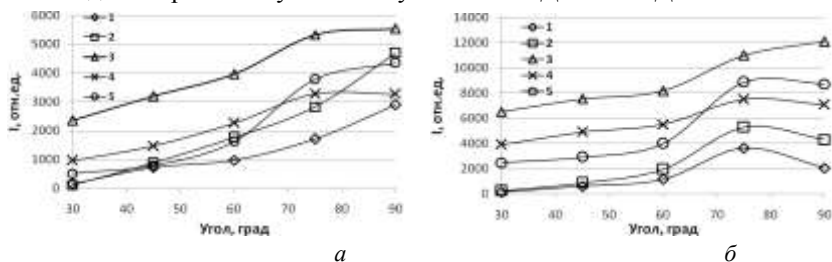


Рис. 1. Зависимость интенсивность полос: 1 - AlN (508,05 нм); 2 - AlO (484,21 нм); ионных линий: 3 - N II (399,5 нм); 4 - Al II (466,3 нм); 5 - Al III (452,92 нм) в спектрах от угла и энергии импульсов: 40 мДж – (а); 54 мДж – (б)

При сопоставлении рисунков видно, что при энергии импульсов 54 мДж интенсивность полос AlN и AlO максимальна, когда угол падающих импульсов 75°. При энергии импульсов 40 мДж интенсивность этих полос больше, когда угол падающих импульсов составляет при 90°.

Показана возможность контроля и управления характеристиками плазмы при получении необходимых концентраций радикалов AlO и AlN в плазме при воздействии серий сдвоенных лазерных импульсов на поверхность алюминиевых сплавов в процессе получения нанокластеров и пленок.

К.И. КОЗЛОВСКИЙ, А.П. МЕЛЕХОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **ГЕНЕРАЦИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМОЙ ЛАЗЕРНО-ИНИЦИИРУЕМОЙ ВАКУУМНОЙ ИСКРЫ**

Изучение условий генерации электромагнитного (терагерцового) излучения плазмой, образуемой при лазерной инициации вакуумного разряда. Лазерное излучение фокусируется вблизи острия конусообразного анода разрядной системы. Энергия накопленная в разрядной системе  $E=15\div 22$  Дж.

K.I. KOZLOVSKIY, A.P. MELEKHOV

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

## **GENERATION OF TERAHERTZ RADIATION BY PLASMA OF LASER TRIGGERED VACUUM SPARK**

The study of conditions of generation of terahertz radiation by plasma which is produced by laser initiated vacuum discharge. Laser radiation is focused near the tip of the conical anode of the discharge system (the discharge energy  $\leq 22$  J).

Цель работы состояла в определении влияния различных параметров лазерно-инициированного вакуумного разряда на эффективность генерации терагерцового излучения (ТИ) плазмой разряда. Эксперименты показали, что терагерцовое излучение генерируется только при *анодном* лазерно-инициированном вакуумном разряде [1]. На рис. 1 схематично показан вид разрядной системы с терагерцовым трактом. Полный вид и описание экспериментальной установки приведены в [2].

Величина энергии инициирующего лазерного импульса  $E_{\text{лазер}}=6\div 20$  мДж при длительности  $\tau \approx 17$  нс. Высвобождаемая в разряде энергия  $\leq 22$  Дж при напряжении  $U=11\div 14$  кВ. Расстояние между катодом и анодом  $\approx 5$  мм. Для регистрации ТИ использовался пироэлектрический датчик с размерами приемной площадки  $2 \times 3$  мм<sup>2</sup> и чувствительностью  $2 \times 10^{-5}$  Вт/В. ТИ излучение выводится из вакуумной камеры через кварцевое окно на котором теряется  $\leq 50\%$  мощности ТИ. На рис. 2 приведены осциллограммы сигналов с пироэлектрического приемника, записанные для случаев с металлическим и тефлоновым экранами. Тефлон пропускает ТИ и отсекает видимое и инфракрасное излучение.



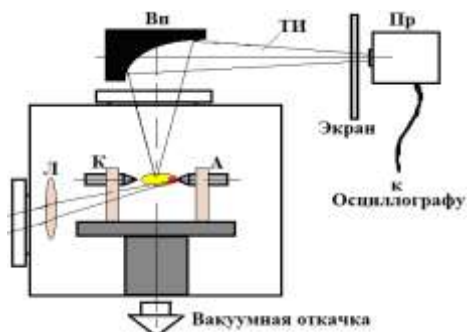


Рис. 1. Вид экспериментальной установки: 1) А, К- анод и катод разрядной системы; Л- линза с  $f=110$  мм; Вп- внеосевой параболоид с  $f=54$  мм; Пр- пирозлектрический приемник для регистрации терагерцового излучения (ТИ) с непрозрачным для видимого излучения экраном

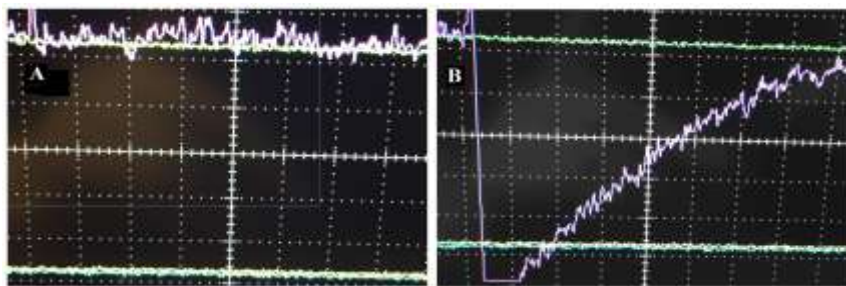


Рис. 2. Осциллограммы сигналов с пирозлектрического датчика: металлический экран (А) и тефлоновый экран (В)

Эксперименты показали, что при *анодном* разряде (фокусировка лазерного импульса на анод) происходит генерация ТИ в 30÷40% разрядов.

Механизмы генерации ТИ плазмой вакуумной искры прорабатываются в настоящее время. С этой же целью проводится серия экспериментов по уточнению условий генерации ТИ при параллельном контроле эмиссии мягкого рентгеновского излучения и ионов из плазмы низкоиндуктивной лазерно-инициированной вакуумной искры.

#### Список литературы

1. Melekhov A.P, et. al. The influence of the conditions of laser initiation on soft X-rays emission of vacuum spark. //J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V.737. P.012013.
2. Alkhimova M.A., et. al. The source of X-rays and high-charged ions based on moderate power vacuum discharge with laser triggering. //Nukleonika. 2015. 60 (2). P.221-227.

Д.А. КУШВАРА, С.А. ПЛИВАК, А.С. ШУМИЛИН  
*Южный федеральный университет, Таганрог*

## **СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ В ЛАЗЕРАХ НА ПАРАХ МЕТАЛЛОВ**

Рассмотрены системы и типы охлаждения рабочей среды в лазерах на парах металлов, в результате чего подобраны оптимальные системы охлаждения. Обоснована актуальность улучшения системы охлаждения, полученные результаты могут применяться в оптических системах.

D.A. KUSHVARA, S.A. PLIVAK, A.S. SHUMILIN  
*Southern Federal University, Taganrog*

## **COOLING SYSTEM THE METAL-VAPOR LASERS**

Analyzed and types of cooling system working fluid in metal-vapor lasers, resulting in optimal cooling system chosen. The urgency to improve the cooling system, the results can be used in optical systems.

Лазеры на парах металлов относятся к ионным лазерам, отличающимся высокой мощностью, узкой направленностью излучения и производительностью. Но наряду с плюсами, есть и недостатки - это высокая температура нагрева для паров металлов, необходимая для эффективной работы лазера. Одним из способов устранения недостатков в конструкции и эксплуатации лазеров на парах металлов является использование для получения рабочих атомов не самих металлов, а их молекулярных соединений с йодом, бромом и другими соединениями. Однако проблема с высокими температурами при работе с данными лазерами остаётся нерешённой

В связи с высокой температурой рабочей среды, стоит вопрос необходимости подбора оптимальной системы охлаждения, в то же время не позволяющей появления конденсата. Наиболее эффективным способом является применение жидкостной системы охлаждения, т.к. при столь высоких температурных показателях, мощностей газового или контактного охлаждения недостаточно. При работе лазеров на парах металлов удобоваримым способом жидкостного охлаждения является использование водяной системы с содержанием 3-4% процентного раствора соляной кислоты. Это объясняется тем, что наряду с высоким показателем стабильности пропускания в области рабочих длин волн и

возможностью отфильтровать инфракрасную часть спектра, вода обладает хорошими термостабилизирующими характеристиками, кроме того она доступна и безопасна в работе, а содержание низкой концентрации соляной кислоты позволит предотвратить образование осадка на внутренних стенках конструкции. При использовании водяной системы охлаждения также стоит обратить внимание на жёсткость воды, и рекомендуется использовать дистиллированную или очищенную воду, также предотвращающую образование накипи и осадка. При использовании ионитовых фильтров, катионы и анионы, содержащиеся в воде, вступают в реакцию с попитами,- веществами, содержащимися в фильтрах, что также уменьшает образование выпадающих осадков.

При работе лазеров на парах металлов на открытых пространствах в зимнее время возможно применение жидкостей, с порогом замерзания ниже, чем у воды: водоспиртовые или этиленгликолевые антифризы. Но их недостатком является низкая температура кипения, в результате которой жидкость, охлаждая рабочую среду лазера, теряет часть спиртового содержания посредством испарения. Благодаря этому температура замерзания этой жидкости повышается, что необходимо учитывать при работе лазеров с низкой температурой окружающей среды. Для предотвращения коррозии в антифризы возможно добавление антикоррозийных ингибиторов, например, молибдата натрия или нитрата натрия.

В связи с высокими температурами рабочей среды и отличающимися температурами внешней, тщательный выбор системы охлаждения для лазера на парах металлов играет основную роль. Правильный выбор типа системы охлаждения, материалов конструкции и вариативности применения позволит подобрать оптимальные характеристики в соответствии с используемыми в лазерах парами металлов и условиями среды.

#### *Список литературы*

1. Волохов В.А., Хрычиков Э.Е., Киселев В.И. Системы охлаждения теплонагруженных радиоэлектронных приборов. Москва: Сов. радио, 1975.
2. Бохина П.А. Эффективные газоразрядные лазеры на парах металлов. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 1978.

Г.С. РОГОЖНИКОВ, В.В. РОМАНОВ, И.В. МИШИНА  
*РФЯЦ - Всероссийский научно-исследовательский институт  
экспериментальной физики, Саров, Нижегородская обл.*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПИКОСЕКУНДНОЙ СТРИК-КАМЕРЫ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПАРАМЕТРОВ СВЕРХКОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В МНОГОКАНАЛЬНЫХ ЛАЗЕРНЫХ УСТАНОВКАХ**

В докладе обсуждается метод одновременной диагностики пространственных и временных параметров сверхкоротких лазерных импульсов, попадающих на поверхность диагностической мишени установок лазерного термоядерного синтеза. В качестве основного инструмента регистрации смещения лазерных импульсов друг относительно друга по времени и по пространству предлагается многодиапазонная стрик-камера с пикосекундным разрешением.

G.S. ROGOZHNIKOV, V.V. ROMANOV, I.V. MISHINA  
*All-Russian Research Institute of Experimental Physics,  
Sarov, Nizhny Novgorod region*

## **APPLICATION OF PICOSECOND STREAK-CAMERA FOR ULTRA-SHORT LASER PULSE DIAGNOSTICS IN MULTICHANNEL LASER FACILITIES**

Simultaneous registration of temporal and spatial parameters of ultra-short laser pulses reaching the auxiliary target surface inside laser confinement fusion facilities is being discussed. Multirange picosecond streak-camera is proposed as means of measuring time- and space-shifts between diagnostic laser beams.

Диагностика сферических мишеней, заполненных смесью изотопов водорода, в установках лазерного термоядерного синтеза осуществляется с помощью рентгеновского источника, предназначенного для определения параметров лазерной плазмы с высоким временным разрешением [1]. Рентгеновский источник представляет собой плоскую вспомогательную мишень, облучаемую ультракороткими (как правило, пикосекундными) лазерными импульсами [2]. В качестве материалов вспомогательной мишени используются тонкие фольги металлов с большим  $Z$  для получения рентгеновских квантов большей энергии при условии сохранения высокой интенсивности излучения и высокого коэффициента конверсии лазерного излучения в рентгеновское [3]. Количество

рентгеновских импульсов, попадающих на вспомогательную мишень, определяется количеством пикосекундных каналов лазерной установки и реализует покадровую временную развёртку процессов, протекающих в основной сферической мишени под воздействием силовых лазерных пучков [4].

Обычно, контроль времени и места попадания сфокусированных диагностических пучков на поверхность вспомогательной мишени достаточно сложен из-за скромного размера мишени (порядка мм<sup>2</sup>) и минимально достижимого расстояния до места установки диагностической аппаратуры (приблизительно радиус камеры взаимодействия, составляющий несколько метров) [5].

Проведенные модельные эксперименты [6] показали, что в качестве универсального инструмента для одновременной прецизионной диагностики пространственно-временных характеристик лазерного излучения, падающего на вспомогательную мишень, можно использовать многодиапазонную стрик-камеру, развертывающую во времени процессы, имеющие характерные длительности от десятков наносекунд, до единиц нано- и пикосекунд. Максимальное разрешение по длительности регистрируемых лазерных импульсов и расстоянию между импульсами составило 1,1 пс, а точность позиционирования лазерных пучков на вспомогательной мишени – до 50 мкм.

*Список литературы*

1. Kyrala G.A., Dixit S., Glenzer S., Kalantar D., et al. Time gated x-ray imaging. // Rev. Sci. Instrum. 2010. 81. 10E316.
2. Garanin S.G., Belkov S.A., Romanov V.V. Petawatt laser system for high-speed processes diagnostics in dense hot plasma. // International Symposium NWP-2014 Proceedings. P.122.
3. Seely J., Holland G., Deslattes R., Hudson L., Bell P., Back C., Miller M. Hard x-ray spectroscopy of NIF targets. // AIP Conference Proceedings. 2000. V.547. Is.1. P.25.
4. Attwood D.T. Laser Implosion Dynamics. LLNL Report UCRL-52000-76-12, 1976.
5. Belkov S.A., Garanin S.G., Shagalkin Yu.V. UFL-2M facility - initial steps for construction. // ICONO/LAT. 2013. LFB2.
6. Garanin S.G., Bel'kov S.A., Rogozhnikov G.S., Rukavishnikov N.N., Romanov V.V., Voronich I.N., Vorob'ev N.S., Gornostaev P.B., Lozovoi V.I., Shchelev M.Ya. PS-1/S1 picosecond streak camera application for multichannel laser system diagnostics. // Quantum Electron. V.44. P.798-800.

А.А. СМИРНОВ, И.М. ГАЗИЗОВ, А.А. ОЛЬНЕВ,  
В.Г. ФЕДОРКОВ, И.А. КАПЛУНОВ<sup>1</sup>

*Институт физико-технических проблем, Дубна*  
*<sup>1</sup>Тверской государственной университет*

## **ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК CZT ДЕТЕКТОРОВ ПРИ ОПТИЧЕСКОМ ВОЗБУЖДЕНИИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА С ВОЗМОЖНОСТЬЮ СКАНИРОВАНИЯ ЛАЗЕРНЫМ ПУЧКОМ**

Измерение характеристик детекторов при сканировании образцов лазерными пучками является в настоящее время мощным средством исследования характеристик материала CdZnTe и CdTe. Как известно, особое значение при изготовлении детекторов и входном контроле материала имеет необходимость измерения однородности полупроводника. Контроль проводится сканированием образца коллимированными пучками источника возбуждения. [1]. Разработанный прибор позволяет регистрировать неравновесный заряд, созданный световым возбуждением.

A.A. SMIRNOV, I.M. GAZIZOV, A.A. OLNEV,  
V.G. FEDORKOV, I.A. KAPLUNOV<sup>1</sup>

*Institute in Physical and Technical Problems, Dubna*  
*<sup>1</sup>Tver State University*

## **MEASURING PERFORMANCE CZT DETECTORS IN OPTICAL EXCITATION OF CHARGE CARRIERS WITH THE ABILITY TO SCAN A LIGHT BEAM**

Measuring the performance of detectors to scan samples of laser beams is now a powerful tool for investigating the characteristics of the material CdZnTe and CdTe. Monitoring is carried out by scanning the sample collimated beam excitation source. Ability to change the intensity of the beam, its size, the use of pulsed excitation by varying the pulse width, are additional factors contributing to the use of laser technology research material. The developed device allows you to record nonequilibrium charge generated by light excitation.

Разработанный прибор позволяет регистрировать неравновесный заряд, созданный световым возбуждением.

Однородность материала детектора оценивалась по результатам измерения относительно эффективности сбора носителей заряда.

Результат сканирования образца CdZnTe №28288 производства фирмы Redlen показан на рис. 1. Как видно из рисунка, образец довольно неоднородный, и в нем присутствует область с пониженным сбором заряда. Полученные результаты согласуются с измерениями сбора носителей при облучении этого образца источником альфа-излучения Pu-239. [2] На амплитудном спектре наблюдались два ярко выраженных пика, принадлежащих двум разным областям.

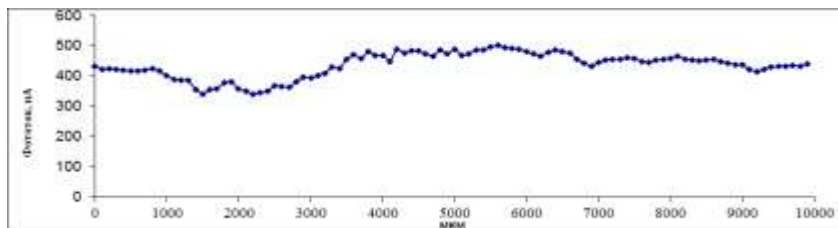


Рис. 1. Зависимость фототока при сканировании образца № 28288 «Redlen» вдоль направления OY

Результаты сканирования образца CdZnTe № 13038 («Redlen») размерами 10x10x5 мм по полной площади показаны на рис. 2. На рисунке ясно видны области повышенного и пониженного сбора носителей. Данная методика определяет дефектные области материала.

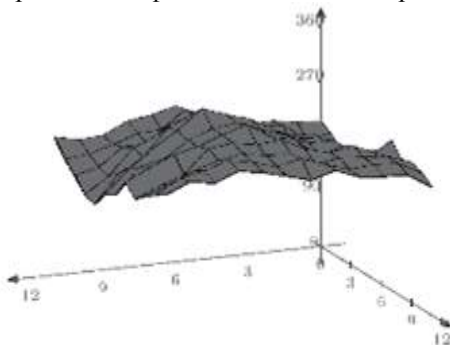


Рис. 2. Карта распределения фототока по площади образца № 13038 «Redlen» (ось OZ – фототок, нА; оси OX и OY – расстояние от угла образца, отн.ед.)

#### Список литературы

1. Kubat J., Franc J., Dedle V., Belas E., Moravec P., Babetsov V., Hoschl R., Grill R. // IEEE Tr. Nucl. Sci. 2011. V.58. P.1953.
2. Luke P.N. // IEEE Tr. Nucl. Sci. 1995. V.42. P.207.

**М.Я. ЩЕЛЕВ, О.И. МЕШКОВ<sup>1</sup>, А.К. ВЕРЕЩАГИН**

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

<sup>1</sup>*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск*

## **РАЗРАБОТКА, КАЛИБРОВКА И ПРИМЕНЕНИЕ ПИКОСЕКУНДНОГО ДИССЕКТОРА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

На основе широко известного пикосекундного электронно-оптического преобразователя ПИФ-01/S1, разработанного и изготовленного в ИОФ РАН, создан пикосекундный диссектор нового поколения. Результаты измерения временной аппаратной функции этого диссектора в статическом режиме, выполненные с помощью фемтосекундного Ti:сапфирового лазера, показали, что величина его временного разрешения (по полуширине) лучше 3-4 пс. Представлены также последние результаты по временному измерению с помощью нового диссектора продольного профиля электронного сгустка в накопителе-охладителе инжекционного комплекса ВЭПП-5 в ИЯФ СО РАН (Новосибирск).

**М. Ya. SCHELEV, O.I. MESHKOV<sup>1</sup>, A.K. VERESCHAGIN**

*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*

<sup>1</sup>*Budker Institute of Nuclear Physics of SB RAS, Novosibirsk*

## **DEVELOPMENT, CALIBRATION AND APPLICATION OF NEW-GENERATION PICOSECOND DISSECTOR**

A new generation of picosecond dissectors was created on the basis of the well known PIF-01/S1 picosecond image converter tube, designed and manufactured at the GPI RAS. The results of the measurements of time response function of the dissector in the static mode, carried out with the help of femtosecond Ti:sapphire laser, showed that temporal resolution of the dissector was better than 3-4 ps (FWHM). The recent results of temporal measurement of longitudinal electron bunch profile into the damping ring of the VEPP-5 injection complex at the BINP SB RAS (Novosibirsk), accomplished by this dissector, are also given in this work.

Диссектор – это электрооптический прибор, предназначенный для временных измерений длительности периодических световых импульсов субпикосекундной и пикосекундной длительности. Диссектор ЛИ-602, разработанный и созданный в ИЯФ СО РАН в 1970-х годах, применяется для измерения продольных профилей электронных и позитронных пучков в циклическом накопителе на основе стробоскопического принципа. Его предельное временное разрешение достигло величины ~ 20 пс, а



динамический диапазон позволяет проводить эксперименты в режиме счета фотонов при исследовании сцинтилляторов и регистрировать синхротронное излучение (СИ) в аналоговом режиме [1]. Источники СИ нового поколения, в том числе лазеры на свободных электронах, требуют повышения временного разрешения прибора, по крайней мере, на порядок. В новом диссекторе было решено использовать хронографический электронно-оптический преобразователь (ЭОП) ПИФ-01, разработанный в ИОФ РАН [2]. Стрик-камера, созданная на базе этого ЭОП и предназначенная для регистрации одиночных или периодических (с частотой повторения до 1 КГц) процессов, имеет величину предельного временного разрешения  $\sim 1$  пс [3]. Такого временного разрешения, если его удастся получить с помощью нового диссектора, достаточно для определения продольного распределения частиц в пучке на подавляющем большинстве циклических ускорителей электронов.

В настоящем докладе сообщается о создании нового электронно-оптического диссектора на базе ЭОП ПИФ-01/S1. Приведены результаты статических измерений временной аппаратной функции диссектора, которые показали, что его предельное временное разрешение может быть лучше 4 пс. Созданная также в отделе фотоэлектроники ИОФ РАН установка с использованием излучения фемтосекундного титан-сапфирового лазера и предназначенная для измерения и калибровки временных параметров диссекторов нового поколения, продемонстрировала свою эффективность и надежность.

С помощью созданного нового диссектора с временным разрешением лучше 4 пс проведены эксперименты по измерению продольного профиля электронного пучка в накопителе-охладителе инжекционного комплекса ВЭПП-5 в ИЯФ СО РАН.

Данная работа сделана при поддержке гранта РФФИ №14-29-00295.

#### *Список литературы*

1. Зинин Э.И., Коробейников Л.С., Кулипанов Г.Н. и др. // Атомная энергия. 1966. Т.20. №3. С.220.
2. Degtyareva V.P., Kulikov Yu.V., Monastyrski M.A., et al. // Proc. SPIE. 1985. V.0491. P.239.
3. Гаранин С.Г., Бельков С.А., Рогожников Г.С. и др. // Квантовая электроника. 2014. Т.44. №8. С.798.

Ю.Ю. БЕЛУХИНА, А.И. ЛЮБИМОВ<sup>1</sup>,  
Г.С. РОГОЖНИКОВ<sup>2</sup>, В.В. РОМАНОВ<sup>2</sup>

*Саровский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Нижегородская обл.*

<sup>1</sup>*НПО «Государственный институт прикладной оптики», Казань*

<sup>2</sup>*РФЯЦ - Всероссийский научно-исследовательский институт  
экспериментальной физики, Саров, Нижегородская обл.*

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СТРЕТЧЕРА И КОМПРЕССОРА ДЛЯ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ПЕТАВАТТНОЙ ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ**

В докладе представлены оптимальные геометрические конфигурации оптических схем стретчера и компрессора для обеспечения требуемых временных и спектральных параметров импульса на выходе многоканальной петаваттной лазерной установки с усилителями на неодимовом стекле.

Yu.Yu.BELUKHINA, A.I. LYUBIMOV<sup>1</sup>,  
G.S. ROGOZHNIKOV<sup>2</sup>, V.V. ROMANOV<sup>2</sup>

*Sarov State Physics and Technical Institute NRNU MEPhI, Nizhny Novgorod region*

<sup>1</sup>*State Institute of Applied Optics, Kazan*

<sup>2</sup>*All-Russian Research Institute of Experimental Physics,  
Sarov, Nizhny Novgorod region*

## **OPTIMIZATION OF STRETCHER AND COMPRESSOR PARAMETERS FOR MULTICHANNEL PETAWATT LASER FACILITY**

This paper deals with optimal geometry configuration of stretcher and compressor optical layouts providing proper temporal and spectral pulse parameters at the output of multichannel petawatt laser facility with neodymium-glass amplifiers.

Параметры стретчера и компрессора для многоканальных петаваттных лазерных установок [1-3] главным образом влияют на временные и фазовые характеристики сжатого импульса. В то же время размеры используемых лазерных пучков и дифракционных решеток определяют пространственные, спектральные и энергетические характеристики. В докладе рассмотрено влияние технологических параметров дифракционных решеток и конфигурации оптических схем стретчера и компрессора на временные и спектральные характеристики импульса. Энергетические характеристики в докладе не затрагиваются, обсуждение некоторых из них было представлено в [4]. Параметрами оптимизации

широкоапертурных компрессоров являлись ширина спектра выходного импульса  $d\lambda$  (по уровню  $e^{-4}$ ), размер  $d$  входного пучка и размер  $G$  второй решетки в плоскости дифракции, коэффициент растяжения/сжатия  $k$ , минимально возможная длительность  $\tau$  сжатого импульса (по уровню FWHM) на выходе компрессора, расстояние  $L$  по нормали между двумя решетками, угол  $\alpha$  падения пучка на первую решетку. Проанализированные варианты компрессоров представлены в таблице.

	$d\lambda$ , нм	$d$ , мм	$G$ , см	$k$ , нс/нм	$\tau$ , фс	$L$ , мм	$\alpha$ , град
№1	5.4	200	75.8	0.166	800	800	73
№2	10.4	200	82.7	0.163	400	800	73
№3	15.4	200	89.7	0.162	250	800	73
№4	20.4	180	89.8	0.166	200	800	73
№5	26.4	150	88.3	0.166	150	800	73
№6	30.4	135	89.2	0.171	130	800	73
№7	5.4	200	84.0	1.055	800	800	60
№8	5.4	130	44.7	0.444	800	340	60

Центральная длина волны излучения выбиралась в диапазоне 1053-1058 нм в зависимости от эффективности усиления в неодимовых усилителях. Частота штрихов решеток  $1740 \text{ мм}^{-1}$  для всех вариантов одинаковая. Заметим, что для растяжения и сжатия импульсов со спектром до 10-13 нм целесообразно использовать схемы с углом падения  $60^\circ$  (варианты №7-8), а со спектром 10-30 нм оптимально использовать  $73^\circ$ . Более того, проведенный анализ показал, что для вариантов №1-6 можно создать универсальную оптическую схему компрессора с решеткой размером 910 мм. Такую схему без перенастройки можно использовать для сжатия импульсов до 130 фс лишь путем изменения на ее входе ширины спектра импульса и размера пучка. Результаты проведенных расчетов позволили создать двухпроходный стретчер Мартинеза для установки [2], согласованный по характеристикам с вариантом компрессора №8, и оформить патенты на оптические системы стретчера и компрессора [5] принадлежащие ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». После отработки режимов усиления широкополосных импульсов в неодимовых стеклах созданный стретчер может быть согласован с вариантами компрессора №1-3. Результаты оптимизации будут использованы при создании широкоапертурного лазерного компрессора.

#### Список литературы

1. Яковлев И.В. // Квантовая электроника. 2014. Т.44. №5. С.393-414.
2. Garanin S.G., Belkov S.A., Romanov V.V. // NWP-2014 Proceedings. P.122.
3. Batani D. // Int. Workshop, COST Meeting. Bordeaux, 2014.
4. Lyubimov A.I., Romanov V.V. // Proceedings of HoloExpo-2015. P.315-317.
5. Патенты РФ №101277 и №2547342.

М.В. РОГОЖИН<sup>1</sup>, В.Е. РОГАЛИН<sup>2,3</sup>, М.И. КРЫМСКИЙ<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>*Национальный центр лазерных систем и комплексов «Астрофизика», Москва*  
<sup>3</sup>*Тверской государственной университет*

## **ДВУХКОМПОНЕНТНЫЕ ВЫХОДНЫЕ ОКНА В ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМАХ ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ**

Проведено численное моделирование поведения двухкомпонентного выходного лазерного окна, состоящего из центральной и периферийной областей, разделенных пластичной прокладкой. Продемонстрированы преимущества использования двухкомпонентной конструкции в условиях функционирования газового лазера в мультикиловаттном диапазоне мощностей.

M. V. ROGOZHIN<sup>1</sup>, V. E. ROGALIN<sup>2,3</sup>, M. I. KRIMSKY<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>*National Center of Laser Systems and Complexes Astrophysica, Moscow*  
<sup>3</sup>*Tver State University*

## **TWO-COMPONENT OUTPUT WINDOWS IN HIGH-POWER LASER SYSTEMS**

A numerical experiment has been conducted in order to evaluate the efficiency of two-component output windows consisting of central and peripheral parts separated by ductile mounting. The results demonstrated for high-power CO<sub>2</sub> laser in multi kilowatt region.

Выходные окна являются одним из ключевых компонентов мощных газовых лазерных систем, оказывая существенное влияние на максимальную мощность и качество выходного излучения. При пропускании излучения мощностью порядка сотен киловатт окно испытывает значительные механические нагрузки, вызванные тепловым расширением. В связи с этим интерес представляют конструкции окна, позволяющие минимизировать возникающие механические напряжения.

В данной работе рассмотрена двухкомпонентная конструкция окна (рис. 1), состоящего из внутренней области (1), пластичной прокладки (2) и периферийной области (3). Излучение мощных лазеров с неустойчивым резонатором в ближней зоне, как правило, имеет кольцевое распределение интенсивности, в связи, с чем центральная область окна не подвергается

воздействию излучения, и поэтому может быть изготовлена из непрозрачного материала. Периферийная область предназначена непосредственно для пропускания излучения, поэтому она изготавливается из традиционных для выходных окон материалов: ZnSe, поликристаллический алмаз, и т.д. [1-3]. Прокладка между центральной и периферийной областью должна обеспечивать вакуумную герметичность, хорошо проводить тепло и обладать механическими свойствами, позволяющими выполнять роль буфера для компенсации температурного расширения частей окна. Для данных целей хорошо подходит пластичный металл индий.

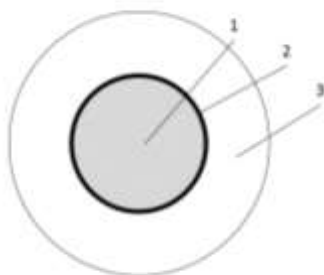


Рис. 1. Схематическое изображение двухкомпонентного окна

В рамках настоящей работы было проведено численное моделирование поведения вышеописанного окна в составе мульткиловаттного  $\text{CO}_2$ -лазера, а также проведено сравнение максимально допустимой мощности выходного излучения лазеров с двухкомпонентным и цельным окнами.

#### *Список литературы*

1. Роголин В.Е. Прозрачные материалы для мощных импульсных  $\text{CO}_2$  – лазеров // Материалы электронной техники. 2013. №2. С.11-18.
2. Рогожин М.В., Роголин В.Е., Крымский М.И., Филин С.А. Моделирование термомеханических процессов в выходном окне высокомощного  $\text{CO}_2$ -лазера // Известия РАН. сер. Физ. 2016. Т.80. №10. С.1410–1416.
3. Рогожин М.В., Роголин В.Е., Крымский М.И., Евстигнеев В.Л. Оптическая стойкость выходных окон мощных лазерных систем // Материалы XXII межд. конф. Оптика и спектроскопия конденсированных сред. Краснодар, 2016. С.147-155.

Д.С. ДУДОВА<sup>1,2</sup>, К.Н. БАРДАКОВА<sup>1</sup>, Б.Ч. ХОЛХОЕВ<sup>3</sup>,  
И.А. ФАРИОН<sup>4</sup>, Б.Д. ОЧИРОВ<sup>4</sup>, В.Ф. БУРДУКОВСКИЙ<sup>4</sup>,  
П.С. ТИМАСHEV<sup>1</sup>, Н.В. МИНАЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,  
Троицк*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

<sup>3</sup>*Бурятский государственный университет, Улан-Уде*

<sup>4</sup>*Байкальский институт природопользования СО РАН, Улан-Уде*

## **ФОРМИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ТЕРМОСТАБИЛЬНЫХ ГЕТЕРОЦЕПНЫХ ПОЛИМЕРОВ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ СТЕРЕОЛИТОГРАФИИ**

Представлена технология создания трехмерных моделей из термостабильных гетероцепных полимеров методом лазерной стереолитографии с использованием излучения в УФ диапазоне. Представлены экспериментальные результаты по лазерной полимеризации данных материалов.

D.S. DUDOVA<sup>1,2</sup>, K.N. BARDAKOVA<sup>1</sup>, B.Ch. HOLHOEV<sup>3</sup>,  
I.A. FARION<sup>3</sup>, B.D. OCHIROV<sup>3</sup>, V.F. BURDUKOVSKIY<sup>3</sup>,  
P.S. TIMASHEV<sup>1</sup>, N.V. MINAEV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Photonic Technologies, – branch of FSRC “Crystallography and  
Photonics” of the RAS, Troitsk*

<sup>2</sup>*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)*

<sup>3</sup>*Buryat State University, Ulan-Ude*

<sup>4</sup>*Baikal Institute of Nature Management SB of RAS, Ulan-Ude*

## **FABRICATION OF THREE-DIMENSIONAL STRUCTURES BASED ON TERMOSTABLE HETEROCHAIN POLYMER COMPOSITIONS BY LASER STEREOLOGRAFY**

Presents the technology of creating three-dimensional models from termostable heterochain polymer materials by laser stereolithography with the UV range radiation. Experimental results on laser polymerization of materials are presented.

Твердофазные композиционные функциональные материалы (металлические, керамические, полимерные) и, прежде всего, объемные структуры на их основе, широко используются в различных областях человеческой деятельности. Существует ряд подходов к созданию таких структур - классические технологии по удалению лишнего материала

(станки ЧПУ, фрезеровка и т.д.) и технологии, основанные на добавлении материала по ходу формирования структуры - аддитивные технологии (3х мерный принтинг, лазерное спекание порошков, лазерная стереолитография). Преимуществом аддитивных технологий, и прежде всего лазерной стереолитографии, является быстрая перестройка возможных вариантов геометрии формируемой структуры, высокая производительность и точность ее воспроизводства. При этом одной из важных задач является создание пластичных термостабильных систем, в том числе для задач разработки гибкой электроники и оптических систем в аэрокосмической области.

Представленная работа направлена на формирования объемных 3D структур с помощью лазерного стереолитографа, который включал в себя DPSS лазер с длиной волны 405 нм и мощностью излучения до 100мВт, однозеркальный гальваносканер с эффективным полем развертки 40x40 мм, f-theta объектив с фокусным расстоянием 160 мм и z-транслятор, позволяющий производить послойную печать. В качестве материала использовалась оригинальная термостабильная композиция гетероцепных полимеров, синтезированная в БИП СО РАН (г. Улан-Уде).

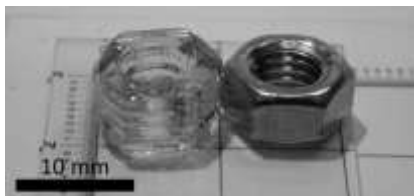


Рис. 1. Полимеризованная модель

На рис. 1 представлена фотография послойно полимеризованной модели, представляющей собой объемную фигуру с шестиугольником (длина стороны 6,4 мм) в основании и отверстием диаметром 4 мм в центре. В результате экспериментов были подобраны режимы создания моделей как с высокой производительностью, которые можно применить для быстрой печати больших моделей, так и с высоким разрешением для печати небольших моделей или сложных контуров.

#### *Список литературы*

1. Knight E., Murray B., Carnachan R., Przyborski S. 3D Cell Culture. // *Methods in Molecular Biology*. 2011. V.695. P.323-340.
2. Timashev P.S., et al. // *High Energy Chemistry*. 2015. V.49. No 4. P.300–303.

А.И. ЛЮБИМОВ<sup>1</sup>, В.В. РОМАНОВ

*РФЯЦ - Всероссийский научно-исследовательский институт  
экспериментальной физики, Саров, Нижегородская обл.*

<sup>1</sup>*НПО «Государственный институт прикладной оптики», Казань*

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК ДЛЯ КОМПРЕССИИ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ**

В докладе рассмотрено влияние технологических параметров диэлектрических дифракционных решеток (ДДР) на спектральное распределение дифракционной эффективности (ДЭ) и лучевую стойкость. Определены для различных частот штрихов решеток и углов падения (геометрические параметры) при заданной центральной длине волны излучения оптимальные технологические параметры: высота штриха решетки; толщины интерференционных слоев с высоким и низким показателями преломления, коэффициент заполнения штриха.

A.I. LYUBIMOV<sup>1</sup>, V.V. ROMANOV

*All-Russian Research Institute of Experimental Physics,  
Sarov, Nizhny Novgorod region*

<sup>1</sup>*State Institute of Applied Optics, Kazan*

## **OPTIMIZATION OF ENERGY CHARACTERISTICS OF DIELECTRIC DIFFRACTION GRATINGS FOR LASER PULSE COMPRESSION**

Influence of technology parameters of dielectric diffraction gratings on spectral distribution of diffraction efficiency (DE) and damage threshold have been studied. Optimal technology parameters such as grating groove height, thickness of high- and low-refraction index interference layers and groove fill factor have been defined for various groove frequencies and incident angles (geometry parameters).

Ранее проводились расчеты ДЭ дифракционных решеток различной конструкции: с отражающим верхним слоем металла, металл – диэлектрические, отражательные диэлектрические. В результате этих исследований были выбраны в качестве наиболее перспективных с точки зрения использования в оптических схемах компрессоров лазерных импульсов две последние конструкции [1-3].

В работе [3] показано, что для диапазона  $\delta\lambda = 1.035 - 1.075$  мкм наиболее оптимальными с точки зрения лучевой стойкости и



спектрального распределения ДЭ в -1 порядке являются ДДР с частотой штрихов  $\nu=1724 \text{ мм}^{-1}$  с многослойным диэлектрическим зеркалом и формой профиля штриха близкой к прямоугольной при угле падения излучения при углах: падения  $\alpha=70.07^\circ$  и автоколлимации  $4^\circ$ . Однако, эти геометрические характеристики не позволяют реализовать оптимальную оптическую схему компрессора для достижения минимальной длительности сжатого импульса ( $\sim 100 - 250$  фс).

Оптимизация дифракционной эффективности в -1 порядке дифракции и лучевой стойкости проводилась для ДДР с  $\nu=1740 \text{ мм}^{-1}$  в диапазоне  $\delta\lambda=1.053-1.058$  мкм. При оптимизации использовалась оценочная функция, как и в работе [4]. Поиск максимума ДЭ проводился в диапазоне 80% – 100%.

Использовались следующие максимальные (0.180, 0.305, 0.113, 0.5,  $78^\circ$ , 1.06) и минимальные (0.100, 0.305, 0.113, 0.3,  $60^\circ$ , 1.045), значения высоты штриха, толщин многослойного покрытия с низким и высоким показателями преломления, коэффициент заполнения штриха, угла падения излучения на ДДР и длины волны, соответственно, (все значения приведены в мкм).

Выбор максимальных и минимальных значений производился на основе предварительных расчетов, оценок и локальной оптимизации ДЭ по небольшому числу параметров одной решетки.

При воздействии падающего на ДДР излучения разрушения поверхности начинаются именно в тех местах штрихов, где электрическое поле имеет максимум. Соответственно, оптимизацией технологических параметров ДДР можно добиться такого распределения электрического поля вблизи гофрированной поверхности, которое обеспечит более высокую лучевую стойкость решетки за счет меньшего проникновения электрического поля в штрих ДДР. В результате оптимизации в диапазоне  $\delta\lambda=1.053-1.058$  мкм ДЭ ДДР составила более 92 % при лучевой стойкости до  $3 \text{ Дж/см}^2$ .

#### *Список литературы*

1. Neauport J., Bonod N. // Proc. of SPIE. 2008. V.7132. 71320D.
2. Neauport J., Bonod N., Hocquet S., et al. // Optics Express. 2010. V.18 (23). P.23776-23783.
3. Skochilov A.F., Lyubimov A.I., Belokopytov A.A., Korennoy K.S. // Proc. of 11 Int. conf. "HoloExpo'2014". Moscow, 2014. P.172-177.
4. Lyubimov A.I., Romanov V.V. // Proc. of 12 Int. conf. "HoloExpo'2015". Moscow, 2015. P.315-318.

М.Г. ГАЛУШКИН

*Институт проблем лазерных и информационных технологий – филиал  
ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Шатура*

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА В ПРОЦЕССЕ ГАЗОЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ МАТЕРИАЛОВ**

На основе использования условия динамического согласования технологических параметров в процессе газолазерной резке определена зависимость коэффициента использования лазерного пучка от скорости резки и мощности пучка. Получено уравнение баланса энергии, относящееся к расширенной области значений скоростей резки.

M.G. GALUSHKIN

*Institute on Laser and Information Technologies – branch of FSRC  
“Crystallography and Photonics” of the RAS, Shatura*

## **EFFICIENCY OF LASER BEAM UTILIZATION IN GAS LASER CUTTING OF MATERIALS**

Relying on the condition of dynamic matching of the process parameters in gas laser cutting, the dependence of the beam utilization factor on the cutting speed and the beam power has been determined. The energy balance equation has been derived that pertains to the wide range of values of the cutting speed.

Технология газолазерной резки (ГЛР), которая к настоящему времени достигла высокого технического уровня и широко применяется в промышленности, является одним из примеров важного практического применения лазеров. В этой технологии большую роль играют процессы взаимодействия излучения сканирующего пучка с конденсированными средами.

Целью работы является исследование зависимости эффективности использования лазерного пучка от скорости ГЛР.

Для случая резки с инертным газом рассматривается уравнение энергетического баланса вида [1]

$$\eta_L \eta_a P_L = P_m + P_T + P_c + P_v, \quad (1)$$

где  $\eta = \eta_L \eta_a$  - эффективность использования лазерного пучка,  $\eta_L$  - коэффициент использования пучка, зависящий от скорости резки,  $\eta_a$  - коэффициент поглощения излучения,  $P_m$  - мощность затрачиваемая на нагрев материала и его плавление,  $P_T$  - мощность, расходуемая на нагрев расплава,  $P_c$  - мощность теплопроводных потерь. Величина мощности  $P_T$  является функцией температуры поверхности расплава  $T_s$ , зависимость которой от скорости определяется из условий динамического согласования движения образца, нагрева с плавлением слоя материала и его выноса из зоны резания. В результате того, что была получена зависимость правой части (1) от скорости, находится эффективность использования лазерного пучка для выбранной скорости резки. Коэффициент использования пучка равен доли мощности излучения, которое облучает поверхность расплава и обеспечивает выполнение энергетического баланса в условиях динамической согласованности технологических параметров. Остальная часть пучка проходит через щель разреза не соприкасаясь с поверхностью расплава и, соответственно не участвует в процессе резки. С уменьшением скорости резки  $\eta_L$  уменьшается, причём  $\eta_L \leq 1$ . Максимальное значение коэффициент использования пучка имеет в случае резки на максимальной скорости, когда весь пучок облучает поверхность расплава. В работе также получены зависимости этого параметра от скорости резки для ГЛР с кислородом малоуглеродистой стали.

Для эффективности использования лазерного пучка с учётом того, что мощность излучения на выходе из щели разреза  $P_{вых} = (1 - \eta_L \eta_a) P_L$ , а на входе  $P_{вх} = P_L$  следует выражение

$$\eta = (P_{вх} - P_{вых}) / P_{вх} \quad (2)$$

Формула (2) при известном коэффициенте поглощения после измерения  $P_{вх}$  и  $P_{вых}$  позволяет определять коэффициент использования пучка и его зависимость от скорости резки. В тоже время находить из эксперимента коэффициент поглощения, пользуясь формулой (2), как делали авторы [2], можно только для максимальной скорости резки, когда  $\eta_L = 1$ .

#### Список литературы

1. Bazyleva I.O., Galushkin M.G., et. al. // Proc. SPIE. 2002. V.4644. P.73-82.
2. Гольшев А.А., Маликов А.Г. и др. // Квантовая электроника. 2015. Т.45. №9. С.873-878.

В.П. ЯКУНИН, А.Г. ГРИГОРЬЯНЦ<sup>1</sup>, В.А. ФУНТИКОВ<sup>1</sup>  
*Институт проблем лазерных и информационных технологий – филиал  
ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Шатура*  
<sup>1</sup>*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

## **ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАЦИИ ВИРТУАЛЬНОЙ И РЕАЛЬНОЙ ЛИНЕЙЕК ОДНОМОДОВЫХ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ ПРИ НЕКОГЕРЕНТНОМ СПЕКТРАЛЬНОМ СУММИРОВАНИИ ПУЧКОВ В УСТОЙЧИВЫХ РЕЗОНАТОРАХ С ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКОЙ**

Проведено моделирование процесса некогерентного спектрального суммирования пучков линейки одномодовых лазерных диодов, используя только один одномодовый диод с просветлённой выходной гранью в устойчивом резонаторе с дифракционной решёткой, перемещаемый в фокальной плоскости согласующей линзы перпендикулярно оси резонатора. Измерены характеристики генерации в зависимости от параметров резонатора и положения лазерного диода в «виртуальной» линейке. Получена генерация и измерены параметры излучения реальной линейки одномодовых лазерных диодов длиной 3мм без использования линейки микролинз.

V.P. YAKUNIN, A.G. GRIGORIANZ<sup>1</sup>, V.A. FUNTIKOV<sup>1</sup>  
*Institute on Laser and Information Technologies – branch of FSRC  
“Crystallography and Photonics” of the RAS, Shatura*  
<sup>1</sup>*Bauman Moscow State Technical University*

## **GENERATION CHARACTERISTICS OF SINGLE-MODE LASER DIODES VIRTUAL AND REAL BARS AT BEAMS SPECTRAL INCOHERENT COMBINING IN STABLE RESONATORS WITH DIFFRACTION GRATING**

The simulation of the single-mode laser diodes bar beams incoherent spectral combining process is carried out, using only one single-mode diode in the stable resonator with a diffraction grating which is moved in the matching lens focal plane perpendicular to the resonator axis. Generation characteristics were measured depending on the resonator parameters and the laser diode position in the "virtual" bar. Single-mode laser diodes real bar generation is obtained for the very first time without the use of microlenses.

В последние годы произошел значительный прогресс в создании лазерных диодных систем прямого действия киловаттного уровня

мощности с высоким качеством излучения Это стало возможным с реализацией способа некогерентного спектрального суммирования пучков линейки одномодовых лазерных диодов, генерирующих различные длины волн в пределах ширины контура усиления одномодового лазерного диода (ОЛД) [1, 2]. Линейка ОЛД с просветленной выходной гранью помещается в устойчивый резонатор с дифракционной решеткой, согласующей линзой и выходным зеркалом. В таком резонаторе получена генерация с мощностью излучения 30-40 Вт практически с дифракционной расходимостью ( $BPP=0,3-0,4$  мм мрад) в области длин волн около 1 мкм. Используя, наряду со спектральным, другие способы суммирования, не ухудшающие при этом пространственную когерентность пучка, таких как поляризационный и волновой, можно получить мощность генерации до 1 кВт со значением параметра качества  $M2$ , близким к 1. волн в спектральном диапазоне 0.8-1.2 мкм Проект реализации такой мощности и высокого качества пучка рассмотрен в [4].

В данной работе впервые смоделирована процедура спектрального суммирования пучков линейки ОЛД, используя только один ОЛД с длиной волны генерации 976 нм и коэффициентом отражения выходной грани диода < 0.1 %, который помещался в устойчивый резонатор, состав которого был подробно рассмотрен ранее. Перемещая ОЛД перпендикулярно оптической оси резонатора, мы получили возможность определять характеристики реального ОЛД в линейке, место которого «занимал» используемый одиночный диод (виртуальная линейка). Были использованы ОЛД с длиной резонатора 3 мм, просветленной выходной гранью сечением 5x5 мкм, с смонтированной одиночной линзой ( $F=370$  мкм) или без неё и мощностью генерации до 400 мВт в непрерывном режиме при токах до 1А. Измеренный диапазон области генерации составил 30-60 нм. В этом же резонаторе получена генерация «реальной» линейки ОЛД в количестве 30 шт. с различной длиной волны в пределах контура усиления без применения линейки микролинз с мощностью излучения суммарного пучка 7,2 Вт в импульсном режиме. Параметр качества суммарного пучка оказался в 2-5 раз больше дифракционного предела в зависимости от добротности резонатора. Спектр генерации, общей шириной 30-40 нм, состоит из нескольких десятков отдельных спектральных компонент, каждая с FWHM менее 0.3 нм.

*Список литературы*

1. Huang R.K., Chann B., et.al. // Technol. Lett. 2007. V.19. No 4. P.209-211.
2. Daneu V., Sanchez A., et.al. // Optics Letters. 2000. V.25, Is.6. P.405-407.
3. Yakunin V.P., Funtikov V.A., Dyachkov R.G. // RU Patent 159472 U1. 2016.
4. Якунин В.П. и др. // Сб. докл. 9 Всеросс. шк. по лаз.физ. и лаз техн. Саров, 2015. С.223.

П.Ю. РОГОВ, С.Э. ПУТИЛИН, С.С. НАЛЕГАЕВ, Ч.-Ж. ЧЖЭН<sup>1</sup>,  
В.Г. БЕСПАЛОВ

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

<sup>1</sup>*Тайваньский государственный педагогический университет, Тайбэй, Тайвань*

## **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С КОЖЕЙ ЧЕЛОВЕКА: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ**

Представленная в предыдущей работе математическая модель процессов возникающих при воздействии фемтосекундного лазерного излучения на кожные покровы подтверждены по средствам эксперимента. Для воздействия на мутные среды, описан механизм воздействия и проведен анализ и получено численное решение системы уравнений, описывающих динамику электронной и атомной подсистемы. Эксперимент осуществлен на высокомошной фемтосекундной установке высокой мощности на основе лазера на кристалле Ti:Sapphire. В качестве тест-объекта была использована куриная кожа.

P.Yu. ROGOV, S.E. PUTILIN, S.S. NALEGAEV, C.-J. CHANG<sup>1</sup>,  
V.G. BESPALOV

*ITMO University, Saint-Petersburg*

<sup>1</sup>*National Taiwan Normal University, Taipei, Taiwan*

## **INTERACTION OF FEMTOSECOND LASER RADIATION WITH HUMAN SKIN: EXPERIMENTAL CONFIRMATION OF THE MATHEMATICAL MODEL**

We confirmed by experiment a previous results the mathematical model of the processes occurring during the interaction of femtosecond laser radiation on the skin. For effects on turbid media we use description mechanism of action is described and analyzed, and the numerical solution of equations describing the dynamics of the electron and phonon subsystems. The experiment was carried out on high-power femtosecond installation of high power laser based Ti: Sapphire. The chicken skin was used as a test object.

В предыдущей работе нами было описан механизм воздействия фемтосекундного лазерного излучения на кожу [1, 2]. Данные модели могут стать важным дополнением к стандартам по безопасным уровням энергии фемтосекундного лазерного излучения [3]. По характеру

воздействия фемтосекундное излучение существенно отличается от излучения большей длительности. В первую очередь стоит учитывать тот факт, что время теплового воздействия существенно превышает длительность одиночного импульса, вследствие чего достижение максимальной температуры будет длиться некоторое время после воздействия. Помимо этого, вследствие высокой плотности мощности возникает ряд нелинейных эффектов: самофокусировка, двух- и трехфотонное поглощение, многофотонная и ударная ионизация, в связи малой длительностью – дисперсионное расплывание импульса во времени и, при высокой плотности энергии – оптический пробой [4]. Фемтосекундное излучение обладает высокой мощностью и может являться существенным фактором риска для персонала.

Представленная модель воздействия фемтосекундного излучения при попадании на кожный покров включает в себя моделирование с помощью метода Монте-Карло для оценки глубины проникновения в ткани кожи [5]. Также с помощью аналитического решения системы уравнений, описывающих электронный баланс между электронной и атомной подсистемой, рассмотрен механизм воздействия фемтосекундного излучения на кожу и произведена оценка временных процессов протекающих при взаимодействии фемтосекундного излучения на кожу.

Эксперимент был проведен с использованием в качестве тест-объекта куриной кожи, по средствам перемещения тест-объекта в околофокальном пространстве был определен порог повреждения тканей при работе лазера в моноимпульсном режиме и измерен уровень энергии излучения, который способен вызвать повреждение тканей кожи.

Результаты данной работы получены в рамках государственного заказа №3.1675.2014/К Министерства образования и науки Российской Федерации.

#### *Список литературы*

1. Rogov P.Yu., et al. Investigation of interaction femtosecond laser pulses with skin and eyes mathematical model. //Journal of Physics: Conference Series. 2016. V.737. No 1. P.012047.
2. Rogov P.Yu., Bepalov V.G. Effects of femtosecond laser radiation on the skin. //Journal of Physics: Conference Series. 2016. V.735. No 1.P.012032.
3. ГОСТ Р 50723-94: Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий. М.: Издательство стандартов, 1995.
4. Sati P., Verma U., Tripathi V.K. Self-focusing and frequency broadening of laser pulse in water. // Physics of Plasmas. 2014. V.21. No 11. P.112110.
5. Пушкарева А.Е. Методы математического моделирования в оптике биоткани: учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2008.

Д.С. ФАРАХОВА<sup>1</sup>, В.И. МАКАРОВ<sup>2</sup>, В.Б. ЛОЩЕНОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ"

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

## **ОЦЕНКА ПРИЖИВЛЕНИЯ КОЖНЫХ ТРАНСПЛАНТАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОЧАСТИЦ ФТАЛОЦИАНИНА АЛЮМИНИЯ И ИНДОЦИАНИНА ЗЕЛЕНОГО МЕТОДАМИ ЛАЗЕРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ**

Методика оценки степени и скорости приживления или отторжения биологической ткани с использованием фотосенсибилизаторов позволяет неинвазивно проводить диагностику путем анализа флуоресцентных изображений и совершать необходимые действия для предотвращения осложнения или отторжения трансплантата.

D.S. FARRAKHOVA<sup>1</sup>, V.I. MAKAROV<sup>2</sup>, V.B. LOSHENOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

<sup>2</sup>Prokhorov general physics institute of the RAS, Moscow

## **EVALUATION OF HEALING SKIN GRAFTS WITH USING ALUMINUM PHTHALOCYANINE NANOPARTICLES AND INDOCYANINE GREEN BY LASER SPECTROSCOPIC METHODS**

Evaluation of degree and rate biological tissue healing or rejection method with using photosensitizers diagnose non-invasively by fluorescence imaging analysis and perform the necessary actions for prevent complications or graft rejection.

Оценка состояния кровотока и лимфотока с применением люминофоров дает широкое представление о стадии процесса приживления. Использование наночастиц фталоцианина алюминия (nAlPc, молекулярная форма разрешена к клиническим применениям) позволяет неинвазивно определять физиологическое состояние кожного покрова и оценивать степень и скорость приживления или отторжения кожных трансплантатов при помощи измерения и анализа спектральных данных в режиме мониторинга с помощью низкоинтенсивных лазеров. При перекрестной трансплантации на спине мыши под правый трансплантат «В» были добавлены nAlPc (рис. 1а), которые не флуоресцируют, но попадая в воспаленную биологическую ткань, молекулы AlPc приобретают флуоресцентные свойства из-за большой концентрации макрофагов [1].



Образование новых сосудистой и лимфатической сетей внутри ткани кожного трансплантата является необходимым условием для его успешного приживления. Применение люминофора, такого как индоцианин зеленый (ICG), позволяет регистрировать флуоресцентные изображения сосудистой и капиллярной сетей для отслеживания процесса приживления кожных трансплантатов. Максимум поглощения ICG наблюдается в ближнем ИК-диапазоне спектра ( $\lambda=805$  нм), что соответствует окну прозрачности биологической ткани, и позволяет регистрировать люминесценцию ( $\lambda=835$  нм) в более глубоких слоях ткани. Для визуализации изображений используется приборный комплекс, состоящий из высокочувствительной видеокамеры, оптического фильтра и источника лазерного излучения ( $\lambda=785$  нм), что позволяет визуализировать флуоресценцию в режиме реального времени.

На флуоресцентном изображении (рис. 1б) виден контраст между здоровой кожей и областями трансплантатов, который не наблюдается спустя два месяца (рис. 1в), что может говорить об образовании новой сосудистой сети внутри ткани трансплантата. После перекрестной трансплантации кожи на спине мыши интенсивность флуоресценции nAIPc в кожном трансплантате возрастала, что свидетельствует о протекании воспалительной реакции в ткани трансплантата (рис. 1г).

Внутривенное введение люминофора ICG позволяет определить скорость прорастания новых сосудов и капилляров в приживляемую ткань. Кроме этого, проведенные исследования местной аппликации nAIPc под трансплантат кожи показали, что интенсивность воспалительных реакций в тканях коррелирует с интенсивностью флуоресценции nAIPc, что позволяет оценить состояние лимфотока.

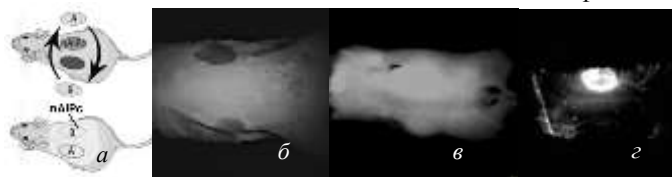


Рис. 1. Схема перекрестной трансплантации мышцы: А-контрольный трансплантат, В-трансплантат с nAIPc (а); флуоресцентное изображение ICG в кровеносной системе мышцы через 7 суток после перекрестной трансплантации (б); флуоресцентное изображение ICG в кровеносной системе мышцы через 2 месяца после перекрестной трансплантации (в); флуоресцентное изображение nAIPc в кожном трансплантате через 7 суток после перекрестной трансплантации (г)

#### Список литературы

1. Steiner R., Breymayer J., Ruck A., Loshchenov V., et al. // Proc. SPIE. 2015. 9308. 93080R.

А.Н. МАЛОВ, Е.А. НОВИКОВА<sup>1</sup>, А.А. ВАЙЧАС<sup>2</sup>

*Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина,  
Воронеж*

<sup>1</sup>*Научный центр проблем здоровья семьи и репродукции человека, Иркутск*  
<sup>2</sup>*Иркутский филиал Московского государственного технического университета  
гражданской авиации*

## **О МЕХАНИЗМЕ ВЛИЯНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЕ В ПРЕПАРАТАХ ЖЕЛЧИ**

Предложен возможный механизм, объясняющий влияние лазерного излучения на процессы минералообразования в объеме желчи человека в экспериментах *in vitro*.

A.N. MALOV, E.A. NOVIKOVA<sup>1</sup>, A.A. VAYCHAS<sup>2</sup>

*Air Force Academy named by prof. N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin, Voronezh*

<sup>1</sup>*Scientific Centre for Family Health and Human Reproduction Problems, Irkutsk*  
<sup>2</sup>*Irkutsk branch of Moscow State Technical University of Civil Aviation*

## **THE MECHANISM OF LASER RADIATION ACTION ON A MINERALIZATION OF THE HUMAN BILE PREPARATIONS**

The possible mechanism about the laser radiation action on a mineral formation in the human bile *in vitro* is discussed.

Экспериментальные исследования показали, что на процессы минералообразования в объеме белой желчи можно влиять, подвергая её воздействию лазерного излучения [1]. Опираясь на полученные результаты, а также на результаты исследований по лазерному отжигу голографических сред, влиянию лазерного излучения на планарную кристаллизацию биоорганических растворов, можно предложить возможный механизм влияния излучения на процессы минерализации, протекающие в объеме биологических и органических сред, в частности, желчи.

Желчь содержит холестерин, желчные кислоты и их соли, фосфолипиды, конъюгированный билирубин, протеин и неорганические ионы. Эти вещества в комплексе с холестерином делают его водорастворимым, образуя так называемый макромолекулярный (липидный) комплекс, выполняющий роль транспортной системы,

который обеспечивает перемещение всех компонентов желчи и сохранение её коллоидной стабильности.

Скорее всего, механизм лазерного воздействия связан с ролью гидратных оболочек, окружающих макромолекулы или частицы в желчи. Если мономолекулярная пленка воды у поверхности коллоидной частицы состоит из дипольных молекул, расположенных нормально к поверхности, то дипольный момент частицы равен нулю. Но такое положение двумерного слоя полярных молекул растворителя на поверхности частицы неустойчиво и слой молекул может спонтанно поляризоваться, вследствие чего образуется «гигантский» диполь или «супердиполь» (рис. 1), который обеспечивает светочувствительность биоорганических растворов [2].

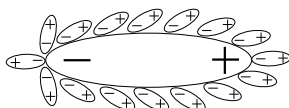


Рис. 1. Спонтанная поляризация двумерного слоя полярных молекул на поверхности частицы [2] – «супердиполь»

Поскольку энергия взаимодействия электрического поля с дипольным моментом зависит от величины последнего, то можно утверждать, что чувствительность к действию лазерного излучения тем выше, чем больше макромолекулы или их кластеры, а результат воздействия может сохраняться макроскопически большое время. Во время взаимодействия лазерного излучения с органическими жидкостями в растворе происходит разрушение крупных ассоциатов молекул вещества, которые должны стать центрами зародышеобразования, на более мелкие объединения, то есть лазерное излучение способно изменять структуру многокомпонентных водных растворов путем разрушения кластеров [3].

#### *Список литературы*

1. Новикова Е.А., Малов А.Н., Вайчас А.А., Камышев И.А. О возможности лазерного управления процессами роста желчных камней // XII Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике: сборник конкурсных докладов. Москва: Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 2014. С.481-487.
2. Толстой Н.А., Спартаков А.А. Электрооптика и магнитооптика дисперсных систем. // СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 1996.
3. Малов А.Н., Вайчас А.А. Лазерное управление формированием биоминералов: Физические принципы и перспективы разработки новой медицинской нанотехнологии. // Saarbrücken, Deutschland: Palmarium Academic Publishing, 2016.

А.С. ШАРОВА<sup>1</sup>, Ю.С. МАКЛЫГИНА<sup>2</sup>, И.Д. РОМАНИШКИН<sup>2</sup>,  
В.Б. ЛОЩЕНОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ"

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

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МОЛЕКУЛЯРНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ БАКТЕРИОХЛОРИНА В КАЧЕСТВЕ АГЕНТОВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ГИПЕРТЕРМИЧЕСКОЙ ТЕРАПИИ ЗЛОКАЧЕСТВЕННЫХ НОВООБРАЗОВАНИЙ**

В работе представлены результаты экспериментальных исследований спектральных и термодинамических свойств наночастиц ИК-фотосенсибилизатора бактериохлорина (Bch NPs). Проведен анализ спектра поглощения водного коллоида Bch NPs, исследована температурная зависимость нагрева наночастиц от длины волны лазерного воздействия. Отмечены перспективы использования Bch NPs в качестве препарата для проведения комплексной фотодинамической и гипертермической терапии.

A.S. SHAROVA<sup>1</sup>, J.S. MCLYGINA<sup>2</sup>, I.D. ROMANISHKIN<sup>2</sup>,  
V.B. LOSCHENOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

<sup>2</sup>Prokhorov general physics institute of the RAS, Moscow

## **THE STUDY OF MOLECULAR BACTERIOCHLORIN NANOCRYSTALS AS AGENTS FOR HYPERTHERMIA THERAPY OF MALIGNANT NEOPLASMS**

This paper presents the results of experimental studies of spectral and thermodynamic properties of IR- photosensitizer bacteriochlorin nanoparticles (Bch NPs). The absorption spectrum of the aqueous Bch NPs colloid and the nanoparticles temperature dependence on the wavelength of the laser exposure were obtained during the study. The prospects of Bch NPs application for complex photodynamic and hyperthermic therapy were noted.

В настоящее время существуют различные физические методы лечения онкологических заболеваний, наиболее эффективными из которых являются фотодинамическая терапия и гипертермия. Метод фотодинамической терапии основан на воздействии лазерного излучения на светочувствительное вещество (фотосенсибилизатор), селективно накапливающееся в патологических тканях [1]. Метод гипертермии заключается в избыточном локальном нагреве патологических тканей, в

которых сконцентрирована основная часть препарата путем повышения температуры наночастиц под воздействием лазерного излучения. Данный метод приводит к тепловому повреждению и разрушению злокачественных новообразований [2].

Объектом данного исследования являются наночастицы мезо-тетра (3-пиридил)бактериохлорина (Bch NPs). Разброс диаметров частиц в водном коллоиде Bch NPs составил 220÷400 нм. В процессе работы получен спектр поглощения Bch NPs с выраженными максимумами на длинах волн 405, 546 и 771 нм (рис. 1а). Отличительной особенностью Bch NPs является наличие пика поглощения в ближнем инфракрасном диапазоне (771 нм), что соответствует области максимальной оптической прозрачности биологических тканей. Таким образом, применение Bch NPs в качестве препарата для фотодинамической и гипертермической терапии позволит воздействовать на глубокозалегающие патологии.

Исследование термодинамических свойств Bch NPs проводилось посредством облучения коллоида наночастиц в диапазоне длин волн 690-900 нм ( $P_{\text{вых}} \sim 0.6 \div 1.6$  Вт;  $t_{\text{ex}} = 3$  мин). Облучение осуществлялось двухфотонным фемтосекундным перестраиваемым лазером Coherent Chameleon Ultra II. Для измерения температуры поверхности коллоида использовалась ИК-камера CEDIP JADE MWIR SC7300M. Наиболее эффективный нагрев коллоида Bch NPs наблюдался при облучении на длине волны 780 нм, соответствующей максимуму поглощения Bch NPs (рис. 1б). При лазерном воздействии температура наночастиц значительно повышалась, что подтверждает возможность их применения для получения терапевтического эффекта при гипертермии. Полученные результаты позволяют считать Bch NPs перспективным препаратом для проведения фотодинамической терапии в сочетании с гипертермией.

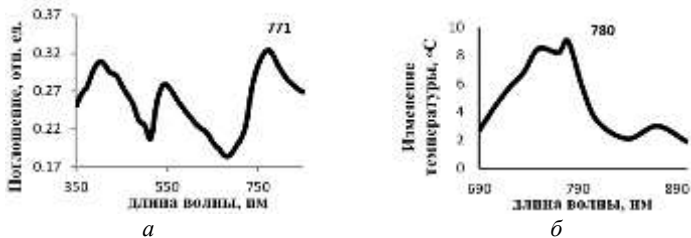


Рис. 1. Спектр поглощения водного коллоида Bch NPs (а); температурная зависимость нагрева Bch NPs от длины волны лазерного воздействия (б)

#### Список литературы

1. Loschenov V.B., Konov V.I., Prokhorov A.M. // Laser Physics. 2000. V.10. P.1188-1207.
2. Hildebrandt B., Wust P., et al. // Critical Reviews in Oncology/Hematology. 2002. 43. P.33-56.

Е.В. ТИМЧЕНКО, П.Е. ТИМЧЕНКО, Е.Г. ЗАРУБИНА,  
Е.С. БУРЕНКОВ, А.А. АСАДОВА, Ю.Д. ИТЯКСОВ  
*Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛЕЧЕНИЯ СТАФИЛОКОККОВОЙ ИНФЕКЦИИ В НЁБНЫХ МИНДАЛИНАХ МЕТОДОМ СПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ**

Проведен анализ эффективности лечения стафилококковой инфекции в нёбных миндалинах с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния (КР). Установлены спектральные изменения при лечении нёбных миндалин антибиотиком Амоксиклав. Показано, что при дозировке антибиотика 500мг/10 мл исчезает линия на волновом числе  $735 \text{ см}^{-1}$ . С помощью оптического метода установлен механизм воздействия антибиотиков на микрофлору нёбных миндалин.

E.V. TIMCHENKO, P.E. TIMCHENKO, E.G. ZARUBINA,  
E.S. BURENKOV, A.A. ASADOVA, Yu.D. ITYAKSOV  
*Samara National Research University*

## **RESEARCH OF EFFECTIVENESS OF THE STAPHYLOCOCCAL INFECTIONS TREATMENT IN THE TONSILS USING RAMAN SPECTROSCOPY**

Analysis of effectiveness of the staphylococcal infections treatment in the tonsils is carried out using Raman spectroscopy method. Spectral changes after the treatment of tonsils using antibiotic were established. It is shown that at a dose of 500 mg/10 mL of the antibiotic, the line at wavenumber of  $735 \text{ cm}^{-1}$  disappears. Using the optical method was described the mechanism of antibiotic action on the microflora of tonsils.

Данные статистики ВОЗ свидетельствуют, что тонзиллитом в мире страдают от 10 до 15% взрослых и около 20-25% детей. От 15 до 45% случаев приходится на бактериальный тонзиллит, вызванный  $\beta$ -гемолитическим стрептококком группы А. В Самарской области по данным медицинских статистических организаций 65% всех заболеваний приходится на ЛОР заболевания, как правило большая часть из них связаны с ХТ (хроническим тонзиллитом). Наиболее значимым бактериальным возбудителем острого тонзиллита (ангины) является гемолитический стрептококк группы А. Реже острый тонзиллит вызывают

вирусы и другие стрептококки, крайне редко – микоплазмы и хламидии. Возбудитель передается воздушно-капельным путем. Источниками инфекции являются больные, а в некоторых случаях – носители болезни, у которых нет явных симптомов. Хронический тонзиллит является следствием неоднократного заболевания ангиной, недостаточного лечения. Учитывая последние данные о большом разнообразии видов возбудителей и тенденции все более частого выявления условно-патогенных микроорганизмов, становится актуальным определение микрофлоры глотки и чувствительности ее к антибиотикам. Отрицательные последствия при неправильном выборе антибиотиков и сроков лечения проявляются в сохранении возбудителей в очаге воспаления и появлении резистентной флоры с последующей хронизацией острого процесса.

В ходе эксперимента исследовано 8 образцов различных штампов стафилококка ATCC №25923 (группа I) и ATCC №35591 (группа II) находящихся в слюне пациентов и физрастворе. Исследуемые образцы подвергались лечению антибиотиком Амоксиклав дозировкой 500мг/10 мл.

Спектральные характеристики изучались с помощью экспериментального стенда, включающего в себя высокоразрешающий цифровой спектрометр Andor Shamrock sr-303i с встроенной охлаждаемой камерой DV420A-OE, волоконно-оптический зонд для спектроскопии комбинационного рассеяния RPB785, совмещённый с лазерным модулем LuxxMaster LML-785.0RB-04 (с регулируемой мощностью до 500 мВт, длина волны 785 нм). Выделение КР спектра на фоне автофлуоресценции проводилось методом полиномиальной аппроксимации флуоресцентной составляющей и вычитания её из регистрируемых спектров. Обработку спектров КР проводили в программе Wolfram Mathematica 9. Исследуемый спектр при обработке очищали от шумов сглаживающим медианным фильтром (5 точек). На выбранном интервале 400-2200 см<sup>-1</sup> при помощи итерационного алгоритма определяли аппроксимирующую линию (полином пятой степени) автофлуоресцентной составляющей, а затем вычитали эту составляющую, получая выделенный спектр КР.

Проведен анализ эффективности лечения стафилококка в небных миндалинах с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния (КР). Установлены спектральные изменения при лечении небных миндалин антибиотиком Амоксиклав. Показано, что при дозировке антибиотика 500мг/10 мл исчезает линия на волновом числе 735 см<sup>-1</sup>.

А.А. ЛЫКИНА, Д.Н. АРТЕМЬЕВ, И.А. БРАТЧЕНКО,  
Ю.А. ХРИСТОФОРОВА, О.О. МЯКИНИН, Т.П. КУЗЬМИНА<sup>1</sup>,  
И.Л. ДАВЫДКИН<sup>1</sup>, В.П. ЗАХАРОВ

*Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева*  
<sup>1</sup>*Самарский государственный медицинский университет*

## **АНАЛИЗ БИОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ С РАЗЛИЧНЫМИ КОНЦЕНТРАЦИЯМИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА СПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ**

Данная работа посвящена исследованию биологических жидкостей с различными концентрациями методом спектроскопии комбинационного рассеяния. В качестве исследуемого материала использовались 10% (100 г/л) раствор человеческого альбумина и плазма крови. Для обработки и анализа данных был использован регрессионный анализ. Полученные результаты показывают, что метод спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) позволяет представить структуру и биохимический состав альбумина, плазмы крови и цельной крови. Проведенное исследование показало зависимость эффективности регистрации КР от формы кюветы, в которой находится исследуемый объем.

A.A. LYKINA, D.N. ARTEMYEV, I.A. BRATCHENKO,  
Yu.A. KHRISTOFOROVA, O.O. MYAKININ, T.P. KUZMINA<sup>1</sup>,  
I.L. DAVYDKIN<sup>1</sup>, V.P. ZAKHAROV

*Samara National Research University*  
<sup>1</sup>*Samara State Medical University*

## **ANALYSIS OF HUMAN BIOFLUIDS WITH DIFFERENT CONCENTRATIONS BY RAMAN SPECTROSCOPY METHOD**

This work is devoted to the human biofluids study with different concentrations by Raman spectroscopy method. 10% (100 g / L) solution of human albumin and plasma blood were tested. Regression analysis was used for data analysis. The results showed that the Raman spectroscopy method allow for representing the structure and biochemical composition of albumin, plasma and whole blood. The study figured out detection efficiency of Raman scattering from the shape of the cuvette.

Данная работа посвящена исследованию различных концентраций биологических жидкостей с помощью установки регистрации спектров комбинационного рассеяния (КР).



В качестве исследуемого материала использовался 10% (100 г/л) раствор человеческого альбумина, образцы человеческой крови и плазмы, полученные из биохимической диагностической лаборатории.

Для исследования биологических жидкостей использовался метод КР, который успешно применялся для исследования различных компонентов крови [1-4]. В состав экспериментальной установки входят лазер (мощность 200 мВт, длина волны 785 нм), оптический модуль фильтрации и регистрирующий приемник – спектрометр QE65Pro с детектором Hamamatsu, охлажденным до - 15°C. Оптическое составляет 0,14 нм.

Для подробного анализа экспериментальных данных и построения предсказывающей кривой был использован метод проекций на латентные структуры (PLS анализ) [5].

Для рассмотрения зависимостей регистрации сигналов КР были использованы алюминиевые кюветы с различным объемом и формой дна. При исследовании спектров плазмы крови были выявлены основные позиции пиков альбумина на длинах волн: 1002 см<sup>-1</sup> (колебания фенилаланина), 1350 см<sup>-1</sup> (колебания группы ароматических кислот), 1450 см<sup>-1</sup> (деформационные колебания СН<sub>2</sub>-группы) и 1650 см<sup>-1</sup> (Амид I).

Максимальное значение точности при исследовании растворов альбумина с разными концентрациями имеют кюветы со сферическим дном и объемами: 0,55 мл (4-8 г/л), 0,9 мл (5-7 г/л), 1 мл (4-6 г/л). При обработке спектральных данных крови методами регрессионного анализа была получена точность определения альбумина 5-7 г/л. Полученные результаты показывают, что метод спектроскопии КР позволяет уверенно регистрировать абнормальные концентрации белковых фракций в плазме крови, а именно, для альбумина точность предсказания составила 6 г/л, тогда как диапазон значений, соответствующих норме, равняется 15-20 г/л.

#### *Список литературы*

1. Dingari N.C., Horowitz G.L., et. al. // PLoS ONE. 2012. V.7. P.2.
2. Berger A.J., Koo T.W., et. al. // Appl Opt. 1999. V.38. P.1.
3. Artemyev D.N., Bratchenko I.A., et al. // Opt Quant Electron. 2016. V.48. P.6.
4. Artemyev D.N., Bratchenko I.A., et al. // Biophotonics: Photonic Solutions for Better Health Care. V.2016.
5. Wold S., et. al. // Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. 2001. P.190-130.

Е.В. ТИМЧЕНКО, П.Е. ТИМЧЕНКО, Д.А. ДОЛГУШКИН<sup>1</sup>,  
Л.Т. ВОЛОВА<sup>1</sup>, А.А. АСАДОВА, Я.В. ФЕДОРОВА,  
С.И. ПРАВЕДНИКОВ

*Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева*  
<sup>1</sup>*Самарский государственный медицинский университет*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ КОСТНЫХ ТКАНЕЙ КРЫС МЕТОДОМ СПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ**

В данной работе были проведены исследования костных тканей крыс методом спектроскопии комбинационного рассеяния. Определены основные спектральные особенности костной ткани в головке и диафизе кости. Введены критерии, позволяющие выявить поражённую костную ткань.

E.V. TIMCHENKO, P.E. TIMCHENKO, D.A. DOLGYSHKIN<sup>1</sup>,  
L.T. VOLOVA<sup>1</sup>, A.A. ASADOVA, Ya.V. FEDOROVA,  
S.I. PRAVEDNIKOV

*Samara National Research University*  
<sup>1</sup>*Samara State Medical University*

## **STUDY OF STRUCTURAL FEATURES OF THE RAT BONE TISSUE USING RAMAN SPECTROSCOPY**

In this work, a study was conducted in rat's bone tissue by Raman spectroscopy. Were identified the main spectral features of bone tissue in the head and shaft of the bone. We introduced criteria allowing to reveal the affected bone tissue.

Заболевания костей разнообразны и полиэтиологичны. Отсутствуют объективные методики, которые позволили бы выявить ранние изменения в качественном и количественном составе костной ткани в эксперименте. Кроме того нередко наблюдаются существенные различия интенсивности патологического процесса в разных частях кости – эпифизах, диафизе, апофизах [1]. Одним из методов диагностики поражения костной ткани в эксперименте может стать спектроскопия комбинационного рассеяния [2-4].

В качестве материалов исследования были использованы 24 плечевых костей крыс. В качестве основных зон исследований были выбраны головки и диафизы костей.

Экспериментальный стенд, реализующий метод спектроскопии комбинационного рассеяния включал в себя высокоразрешающий цифровой спектрометр Shamrock sr-303i с встроенной охлаждаемой камерой DV420A-OE, волоконно оптический зонд для спектроскопии комбинационного рассеяния RPB785, совмещённый с лазерным модулем LuxxMaster LML785.0RB-04 (с регулируемой мощностью до 500 мВт, длина волны 785 нм). Мощность излучения 500 мВт не вызывает никаких деструктивных нарушений ткани. Обработку спектров КР проводили в программе Wolfram Mathematica 9.

В результате проведенных исследований получены спектры комбинационного рассеяния разных участков плечевых костей крыс. Наблюдали явные различия в спектрах, полученных с головок и диафизов костей, на волновых числах  $956\text{ см}^{-1}$  ( $\text{PO}_4^{3-}$  ( $\nu_1$ ) (P-O симметричное валентное)),  $1065\text{ см}^{-1}$  ( $\text{CO}_3^{2-}$ , (C-O плоскостное валентное)),  $1562\text{ см}^{-1}$  (амид II),  $1658\text{ см}^{-1}$  (амид I). Введены критерии, позволяющие выявить поражения костной ткани в разных участках кости.

*Список литературы*

1. Morris M.D., Mandair G.S. Raman Assessment of Bone Quality. // Symposium Bone quality: from bench to bedside. 2011. 469. P.2160–2169.
2. Orkoulas M.G., Vardakia M.Z., Kontoyannisa C.G. Study of bone matrix changes induced by osteoporosis in rat tibia using Raman spectroscopy.
3. Carden A., Rajachar R.M., Morris M.D., Kohn D.H. Ultrastructural Changes Accompanying the Mechanical Deformation of Bone Tissue: A Raman Imaging Study. // Calcif Tissue Int. 2003. 72. P.166–175.
4. Morris M.D., Carden A., Rajachar R.M., Kohn D.H. Bone microstructure deformation observed by Raman spectroscopy. // Proc SPIE. 2001. V.4254. P.81–89.

Е.В. ТИМЧЕНКО, П.Е. ТИМЧЕНКО, Л.Т. ВОЛОВА<sup>1</sup>,  
Д.А. ДОЛГУШКИН<sup>1</sup>, М.Д. МАРКОВА, Е.Ф. ЯГОФАРОВА  
*Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева*  
<sup>1</sup>*Самарский государственный медицинский университет*

## **АНАЛИЗ СУСТАВНОЙ ЖИДКОСТИ С ПОМОЩЬЮ СПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ**

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований синовиальной жидкости с помощью метода спектроскопии комбинационного рассеяния, полученной из полости сустава до и во время операции, выполняемой по поводу деформирующего остеоартроза. Основные изменения спектров синовиальной жидкости отмечены на линиях интенсивности  $945\text{ см}^{-1}$  и  $1640\text{ см}^{-1}$ , которые соответствуют гиалуроновой кислоте и Амиду I.

E.V. TIMCHENKO, P.E. TIMCHENKO, L.T. VOLOVA<sup>1</sup>,  
D.A. DOLGYSHKIN<sup>1</sup>, M.D. MARKOVA, E.F. YAGOFAROVA  
*Samara National Research University*  
<sup>1</sup>*Samara State Medical University*

## **ANALYSIS OF JOINT FLUID USING RAMAN SPECTROSCOPY**

This paper presents the results of experimental studies of synovial fluid, obtained from the joint cavity before and during an operation performed for the deforming osteoarthritis, using Raman spectroscopy method. The main changes of the spectra of synovial fluid seen on the peaks intensities of wavenumbers  $945\text{ cm}^{-1}$  and  $1640\text{ cm}^{-1}$  that correspond to the following substances hyaluronic acid and Amide I respectively.

Содержащаяся в полости сустава синовиальная жидкость (СЖ) является биологической средой, уникальной по биофизическим, физико-химическим свойствам и составу, обеспечивающей скольжение суставных поверхностей костей, играющей демпферную функцию [1].

Исследование СЖ нередко позволяет уточнить диагноз, определить степень воспалительной активности процесса в суставе [2].

В работе представлены результаты экспериментальных исследований синовиальной жидкости, полученной из полости сустава до и во время операции, выполняемой по поводу деформирующего остеоартроза с помощью метода спектроскопии комбинационного рассеяния. Забор СЖ производили одноразовым шприцем.

В результате анализа с помощью метода спектроскопии комбинационного рассеяния можно идентифицировать компонентный состав исследуемого вещества. Были зарегистрированы следующие спектральные особенности СЖ, полученной из пораженного остеоартрозом сустава: низкое содержание гиалуроновой кислоты (значение интенсивности на волновом числе  $945\text{ см}^{-1}$ ), которая является основным компонентом СЖ и обеспечивает её вязкоупругие свойства [3]; высокое содержание Амида I (значение интенсивности на волновом числе  $1640\text{ см}^{-1}$ ), являющегося важным звеном структур хрящевой ткани [4].

Исследование синовиальной жидкости с помощью метода спектроскопии комбинационного рассеяния может стать в дальнейшем новым диагностическим скринингом для выявления суставной патологии.

*Список литературы*

1. Чернякова Ю.М., Сементовская Е.А. Синовиальная жидкость: состав, свойства, лабораторные методы исследования. 2005. №2.

2. Захарова М.М. Исследования синовиальной жидкости. // В кн.: Ревматология Национальное руководство. Под ред. академика РАМН Е.Л. Насонова и академика РАМН В.А. Насоновой. М., ГЭОТАР-Медиа, 2008. С.62-66.

3. Герасимов А.М., Фурцева Л.Н. Биохимическая диагностика в травматологии и ортопедии. М.: Медицина, 1986.

4. Лабораторные методы клинического исследования / под ред. М. Тульчинского. Варшава: Польское гос. мед. издательство, 1965.

Л.А. ШАМИНА, И.А. БРАТЧЕНКО, Д.Н. АРТЕМЬЕВ,  
О.О. МЯКИНИН, А.А. МОРЯТОВ<sup>1</sup>, С.В. КОЗЛОВ<sup>1</sup>,  
В.П. ЗАХАРОВ

*Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева*  
<sup>1</sup>*Самарский государственный медицинский университет*

## **РАМАНОВСКАЯ И ФЛУОРЕСЦЕНТНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ РАКА**

Представлены результаты исследования спектральных характеристик биожидкостей организма с помощью рамановской спектроскопии и автофлуоресцентного анализа. Выявлены спектральные особенности биожидкостей при наличии рака различной локализации. Продемонстрирована возможность создания Lab-on-a-chip системы на основе разрабатываемых оптических методов.

L.A. SHAMINA, I.A. BRATCHENKO, D.N. ARTEMYEV,  
O.O. MYAKININ, A.A. MORYATOV<sup>1</sup>, S.V. KOZLOV<sup>1</sup>,  
V.P. ZAKHAROV

*Samara National Research University*  
<sup>1</sup>*Samara State Medical University*

## **RAMAN AND FLUORESCENCE SPECTROSCOPY OF HUMAN BODY FLUIDS FOR CANCERS DETECTION**

The results of the study of the body fluids analysis with Raman spectroscopy and autofluorescence are presented. The body fluids spectral features in the presence of various cancers are detected. We have demonstrated the possibility of creating Lab-on-a-chip systems based on proposed spectral methods.

По данным Всемирной организации здравоохранения, заболеваемость злокачественными опухолями непрерывно растёт. В силу того, что существующие методы диагностики малоэффективны на ранних стадиях развития рака, требуется создание новых методов определения онкологических патологий на стадии, когда с ними можно успешно бороться. Возникновение рака различной локализации провоцирует изменение гомеостаза биожидкостей организма. Система Lab-on-a-chip (ЛОС) [1] для рамановской спектроскопии (РС) [2] и автофлуоресцентного (АФ) анализа [3] позволит обнаружить эти

изменения на молекулярном уровне с малыми затратами на проведение анализа.

Целью работы являлось исследование спектральных особенностей различных биожидкостей организма с помощью РС и АФ, а также создание на их основе LOC системы для скрининговых исследований.

Для исследований биожидкостей с помощью РС и АФ спектры регистрировались высокоразрешающим цифровым спектрометром Shamrock SR-500i со встроенной охлаждаемой камерой DV420A-OE фирмы ANDOR. Возбуждение спектров РС и АФ производилось излучением лазерного модуля LuxxMaster Raman Voxh фирмы PD-LD (центральная длина волны 785 нм, мощность 190 мВт). Фокусировка и фильтрация сигнала осуществлялась пробником RPB785 фирмы InPhotonics. В процессе работы исследованы образцы биожидкостей пациентов с различными диагнозами рака. Исследуемые биожидкости помещались на подложку из ПММА с тонким алюминиевым покрытием. Подложка имитировала камеру LOC устройства и учитывала фокусное состояние фокусирующей линзы используемого пробника.

Особенности метаболизма раковых клеток изменяют нормальную концентрацию различных клеточных элементов биожидкостей [4], поэтому для оценки спектральных особенностей биожидкостей были введены оптические коэффициенты, пропорциональные изменениям липидов и аминокислот. При анализе одномерного распределения значений введенных оптических коэффициентов, чувствительность определения плоскоклеточного рака легкого от других видов рака легкого составила 83% - 91%, специфичность – 88% - 94%. Чувствительность определения рака легкого от других видов опухолей составила 98%, а специфичность – 85%. Объединение РС и АФ анализа в едином методе диагностики позволяет получать общую точность обнаружения конкретного вида рака на уровне 97%. Соединение РС и АФ возможно в едином устройстве, поэтому проведенные исследования подтверждают возможность успешного применения LOC для скрининговых исследований рака по микродозе биожидкости.

#### *Список литературы*

1. Ashok P. C., et. al. // J. Opt Express. 2010. V.18. P.7642-7649.
2. Dahu Q., et. al. // J. Applied optics. 2007. V. 46. P.1726-1734.
3. Rajasekaran R., et. al. // J. Photochemistry and Photobiology. 2012. V.89(2). P.483-491.
4. Mantrov D.A. Encyclopedia of Clinical Oncology. M.: Scientific Book, 2009.

П.Е. ТИМЧЕНКО, Е.В. ТИМЧЕНКО, Л.Т. ВОЛОВА<sup>1</sup>,  
Д.А. ДОЛГУШКИН<sup>1</sup>, О.О. ФРОЛОВ, В.Д. МЕЩЕРЯКОВ,  
А.В. БАЛМАСОВ

*Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева*  
<sup>1</sup>*Самарский государственный медицинский университет*

## **ОПТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ СОСТАВА КОСТНЫХ ИМПЛАНТАТОВ В ПРОЦЕССЕ ИХ ОБРАБОТКИ**

Представлены результаты исследования влияния ультразвуковой обработки на состав костных имплантатов с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния. На основе проведенного анализа были введены оптические коэффициенты, отражающие изменение относительной концентрации компонентов костной ткани, которые определяют качество имплантатов. Установлено, что спектроскопия комбинационного рассеяния может быть использована для оценки изменения состава костных имплантатов в процессе их обработки.

P.E. TIMCHENKO, E.V. TIMCHENKO, L.T. VOLOVA<sup>1</sup>,  
D.A. DOLGYSHKIN<sup>1</sup>, O.O. FROLOV, V.D. MESHCHERYAKOV,  
A.V. BALMASOV

*Samara National Research University*  
<sup>1</sup>*Samara State Medical University*

## **OPTICAL EVALUATION OF CHANGES IN THE COMPOSITION OF BONE IMPLANTS DURING PROCESSING**

In this paper we present the research results of ultrasound influence on the composition of bone implants using Raman spectroscopy method. Based on the analysis, optical coefficients reflecting changes in the relative concentration of bone components were introduced, which define the quality of implants. It is found that Raman spectroscopy can be used to assess changes in bone implant composition during processing.

Костные имплантаты используются в реконструктивной хирургии для восстановления структурной целостности костей и повышения остеогенного потенциала костной ткани [1]. Качество аллогенной костной ткани для трансплантации напрямую зависит от способов ее получения,



обработки и хранения. Костные имплантаты должны быть неиммуногенными, биорезорбируемыми [2].

Объектами исследования являлись образцы трехмерного материала твердой губчатой костной ткани. В процессе производства костных биоимплантатов проводилась низкочастотная ультразвуковая обработка, в результате которой образцы обезжиривались, и происходило удаление всех элементов костного мозга из межбалочных пространств кости. Затем для получения деминерализованного биоматериала костную ткань помещали в раствор соляной кислоты. Контрольные образцы не подвергались процессу деминерализации и обработки ультразвуком.

В качестве основного метода исследований биоимплантатов был использован метод спектроскопии комбинационного рассеяния, реализуемый с помощью экспериментального стенда. Характеристики стенда: диапазон сканирования длин волн от 190 нм до 1200 нм; время экспозиции от 0,04 до 600с; разрешение камеры 1024\*255 пикселей, мощность лазера 50-450 мВт.

Ультразвуковая обработка биоимплантатов характеризуется изменением интенсивности пиков комбинационного рассеяния на волновых числах  $811\text{ см}^{-1}$ ,  $918\text{ см}^{-1}$ ,  $1174\text{ см}^{-1}$ ,  $1420\text{ см}^{-1}$  и  $1450\text{ см}^{-1}$ , отражающих изменение относительной концентрации липидов, РНК и ДНК в составе костной ткани.

#### *Список литературы*

1. Кирилова И.А. Деминерализованный костный трансплантат как стимулятор остеогенеза: современные концепции // Хирургия позвоночника. 2004. No 3. С.105-110.
2. Берченко Г.Н. Костные трансплантаты в травматологии и ортопедии // Биоматериалы. 2008. №9. С.4-5.

Е.В. ТИМЧЕНКО, П.Е. ТИМЧЕНКО, Л.Т. ВОЛОВА<sup>1</sup>,  
П.Ю. ШАЛКОВСКАЯ, Д.С. ТРАПЕЗНИКОВ

*Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева*

<sup>1</sup>*Самарский государственный медицинский университет*

## **СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛАПАНОВ СЕРДЦА НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ ИХ ДЕЦЕЛЛЮЛЯРИЗАЦИИ**

Представлены экспериментальные данные по анализу качественного состава клапанов сердца на различных этапах децеллюляризации с помощью метода спектроскопии комбинационного рассеяния (КР). Анализ спектров КР позволил выявить основные линии, соответствующие таким компонентам, как амиды, гликозаминогликаны, липиды и ДНК. Также был проведен двумерный анализ, который позволил сравнить основные составляющие компоненты нативных и образцов, подверженных децеллюляризации.

E.V. TIMCHENKO, P.E. TIMCHENKO, L.T. VOLOVA<sup>1</sup>,  
P.Yu. SHALKOVSKAYA, D.S. TRAPEZNIKOV

*Samara National Research University*

<sup>1</sup>*Samara State Medical University*

## **SPECTRUM ANALYSIS OF STRUCTURAL CHANGE OF HEART VALVES FOR VARIOUS STAGES OF THEIR DECELLULARIZATION**

Experimental data on the analysis of the qualitative composition of heart valves in various stages decellularization by the method of Raman spectroscopy (RS). Raman spectra analysis revealed the main lines, the relevant components such as amides, glycosaminoglycans, lipids and DNA. Also, a two-dimensional analysis was carried out, which allowed to compare the main constituent components of native and samples subjected decellularization.

Ежегодно от болезней сердца умирают около 17 миллионов человек, что составляет примерно 29 % всех случаев смерти [1]. Среди болезней, поражающих сердце, значительную долю составляют патологии сердечных клапанов, для замены которых применяют различные импланты. В настоящее время отдается предпочтение материалам биогенной природы, часть которых используют, выполнив их предварительную децеллюляризацию, то есть удаление клеток из ткани с

сохранением внеклеточного матрикса [2]. Контроль эффективности процесса децеллюляризации с помощью физических методов является весьма актуальной задачей.

В качестве материала исследования использованы нативные и децеллюляризованные аортальные и митральные клапаны половозрелых баранов при различной длительности децеллюляризации. Децеллюляризацию клапанов с получением экстраклеточных матриксов проводили согласно протоколу, предоставленным профессором А. Лихтенбергом (Дюссельдорф, Германия).

Спектральные характеристики образцов изучали с помощью экспериментального стенда, включающего в себя высокоразрешающий цифровой спектрометр Shamrock sr-303i с встроенной охлаждаемой камерой DV420A-OE, волоконно-оптический зонд для спектроскопии комбинационного рассеяния RPB785, совмещённый с лазерным модулем LuxxMaster LML-785.0RB-04 (с регулируемой мощностью до 500 мВт, длина волны 785 нм).

Установлено, что при исследовании нативных клапанов сердца и различных экстраклеточных матриксов на их основе, основные различия проявляются на волновых числах  $812\text{ см}^{-1}$ ,  $854\text{ см}^{-1}$ ,  $935\text{ см}^{-1}$ ,  $1062\text{ см}^{-1}$ ,  $1271\text{ см}^{-1}$ ,  $1450\text{ см}^{-1}$  и  $1661\text{ см}^{-1}$ , соответствующих РНК, гидрокиоприну, коллагену, ДНК, амидам и липидам.

Метод спектроскопии комбинационного рассеяния позволяет оценивать структурные изменения в тканях имплантатов на различных этапах их обработки.

#### *Список литературы*

1. Данилина О.С. Комплекс суточного мониторинга гемодинамических показателей сердечно-сосудистой системы человека. // Вестник Пензенского государственного университета. 2015. № 3 (11). С.114-117.
2. Moroni F. Decellularized matrices for cardiovascular tissue engineering. // Am J Stem Cells. 2014. №3(1). P.1-20.

В.С. ПЕРЕСКОКОВ, В.А. ГОРИШНИЙ, И.В. ДЗЕДОЛИК  
*Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь*

## УПРАВЛЕНИЕ ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОННЫМИ ВИХРЯМИ

На границе металла и диэлектрика могут быть возбуждены поверхностные плазмон-поляритоны (ППП). При отражении ППП от границ неоднородности диэлектрической проницаемости металла имеет место интерференция падающих и рассеянных ППП. Если неоднородность на поверхности металла имеет криволинейную границу, то в интерференционном поле возможно образование сингулярных точек, в которых возникают вихри ППП с винтовой дислокацией фазы. Кривизной границ неоднородности диэлектрической проницаемости на поверхности металла можно управлять с помощью внешнего электростатического поля.

V.S. PERESKOKOV, V.A. GORISHNIY, I.V. DZEDOLIK  
*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol*

## CONTROL OF PLASMON-POLARITON VORTICES

Surface plasmon polaritons (SPP) can be excited at the metal and dielectric interface. Upon reflection from the boundary of inhomogeneity of metal permittivity takes place the interference of the incident and scattered SPP. If the inhomogeneity of the metal surface has a curved boundary, it is possible the formation of singular points in the interference field, in which there are the SPP vortices with a phase screw dislocation. Curvature of the inhomogeneity boundary of the metal permittivity at the surface can be controlled by an external electrostatic field.

На границе металла с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_M < 0$ , и диэлектрической среды с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_0 > 0$ , могут быть возбуждены поверхностные плазмон-поляритоны (ППП) [1, 2]. В области отрицательных значений  $\varepsilon_M < 0$  ППП распространяются по поверхности металла, в области положительных значений  $\varepsilon_M > 0$  граничные условия  $-\varepsilon_M \alpha_0 = \varepsilon_0 \alpha_M$  не выполняются (здесь  $\alpha_M > 0$ ,  $\alpha_0 > 0$  - декременты ППП по нормальной к поверхности оси). ППП рассеиваются на неоднородностях металлической поверхности, меняют направление распространения, кривизну волнового фронта [3, 4].

Внешнее электростатическое поле, например, отрицательно заряженного зонда, изменяет диэлектрическую проницаемость металла,

которая может приобрести положительные значения в некоторой области в оптическом диапазоне частот  $\varepsilon_M(\omega) > 0$ . В этой области граничные условия распространения ППП нарушаются, ППП рассеиваются на границе возникшей неоднородности диэлектрической проницаемости металла. При отражении ППП от криволинейной границы неоднородности на поверхности металла в интерференционном поле возникают сингулярные точки, в которых образуются вихри ППП [5, 6], характеризующиеся винтовой дислокацией фазы.

На рис. 1 приведено распределение амплитуды и фазы интерференционного поля нормальной к границе металла компоненты вектора Пойнтинга ППП при разной кривизне границы неоднородности.

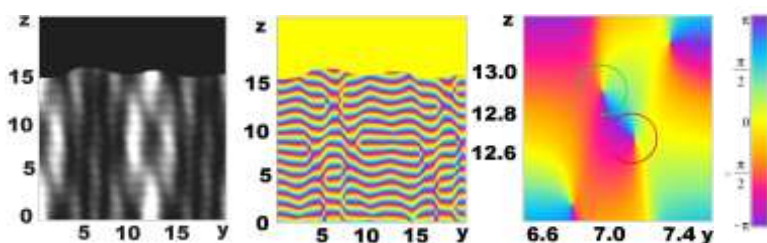


Рис. 1. Распределение нормальной к границе компоненты вектора Пойнтинга ППП при различных радиусах кривизны границы неоднородности диэлектрической проницаемости металла: слева – интерференционные линии; в центре – распределение фазы; справа – винтовые дислокации фазы (вихри ППП), значения по осям  $(y, z)$  – в микрометрах

Изменяя радиус кривизны границы неоднородности диэлектрической проницаемости металла, или ее конфигурацию, можно управлять топологией вихрей ППП.

#### Список литературы

1. Поверхностные поляритоны / ред. В.М. Агранович, Д.Л. Миллс. М.: Наука, 1985.
2. Климов В.В. Наноплазмоника. М.: Физматлит, 2010.
3. Dzedolik I.V. Solitons and nonlinear waves of phonon-polaritons and plasmon-polaritons. New York: Nova Science Publishers, 2016.
4. Zhou H., Dong J., Zhou Y., Zhang J., Liu M., Zhang X. Designing appointed and multiple focuses with plasmonic vortex lenses // IEEE Photonics J. 2015. V.7. No 4. 4801007.
5. Dzedolik I.V., Pereskokov V.S. Formation of vortices by interference of surface plasmon polaritons // J. Opt. Soc. Am. A. 2016. V.33. No 5. P.1004-1009.
6. Dzedolik I.V., Lapayeva S.N., Pereskokov V.S. Vortex lattice of surface plasmon polaritons // J. Opt. 2016. V.18. No 7. 074007.

В.А. МАКАРОВ, В.М. ПЕТНИКОВА, П.С. РЫЖИКОВ,  
**В.В. ШУВАЛОВ**, А.В. ЯДВИЧУК  
*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

## **ЭЛЛИПТИЧЕСКИ ПОЛЯРИЗОВАННЫЙ БРИЗЕР В ИЗОТРОПНОЙ ГИРОТРОПНОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ СРЕДЕ**

Найдено частное аналитическое решение неинтегрируемой задачи распространения плоской электромагнитной волны через изотропную гиروتропную нелинейную среду в форме эллиптически поляризованного бризера.

V.A. MAKAROV, V.M. PETNIKOVA, P.S. RYZHIKOV,  
**V.V. SHUVALOV**, A.V. YADVICHUK  
*Lomonosov Moscow State University*

## **ELLIPTICALLY POLARIZED BREATHER IN NONLINEAR ISOTROPIC GYROTROPIC MEDIUM**

Particular analytical solution of the nonintegrable problem of a plane electromagnetic wave propagation through an isotropic gyrotropic nonlinear medium in the form of elliptically polarized breather is found.

В последние годы достигнут значительный прогресс в исследовании частных аналитических и приближенных решений двух связанных нелинейных уравнений Шредингера (см., например, [1, 2]), определяющих, в частности, динамику распространения коротких световых импульсов в двулучепреломляющих волоконных световодах или оптически активных средах. В настоящее время известно и детально изучено множество точных частных решений этих уравнений, описывающих эллиптически поляризованные солитоны, кноидальные волны, бризеры, “Rogue-waves” и т.д., а также взаимодействие между ними. Ниже это множество дополняется еще одним новым точным вырожденным частным решением неинтегрируемой задачи распространения эллиптически поляризованной плоской волны в изотропной среде с частотной дисперсией и пространственной дисперсией кубической нелинейности.

Уравнения для медленно меняющихся комплексных амплитуд  $A_{\pm}(z, t) = E_x(z, t) \pm E_y(z, t)$  циркулярно поляризованных компонент электрического поля эллиптически поляризованной волны,

распространяющейся вдоль оси  $z$  в среде с частотной дисперсией и пространственной дисперсией кубической нелинейности, имеют вид [3,4]:

$$\frac{\partial A_{\pm}}{\partial z} - i \frac{k_2}{2} \frac{\partial^2 A_{\pm}}{\partial t^2} + i \left[ \mp \rho_0 + \left( \frac{\sigma_1}{2} \mp \rho_1 \right) |A_{\pm}|^2 + \left( \frac{\sigma_1}{2} + \sigma_2 \right) |A_{\mp}|^2 \right] A_{\pm} = 0.$$

Здесь  $t$  – время в бегущей системе координат, параметр  $k_2 = d^2k/d\omega^2 \neq 0$  учитывает частотную дисперсию второго порядка;  $k$  – волновое число,  $\omega$  – несущая частота;  $\sigma_1 = 4\pi\omega^2 \chi_{xyxy}^{(3)}/kc^2$  и  $\sigma_2 = 2\pi\omega^2 \chi_{xyxy}^{(3)}/kc^2$  заданы независимыми компонентами тензора локальной кубической нелинейности  $\hat{\chi}^{(3)}(\omega, -\omega, \omega, \omega)$ , а  $\rho_{0,1} = 2\pi\omega^2 \gamma_{0,1}/c^2$  определены через псевдоскалярные константы  $\gamma_{0,1}$  линейной и нелинейной гирации.

Найденные новые точные вырожденные частные решения имеют вид:

$$A_{\pm}(z, t) = B(\sigma_2 \mp \rho_1)^{1/2} \frac{(1-4a) \operatorname{ch}(bz) + \sqrt{2a} \cos(\Omega t) - ib \operatorname{sh}(bz)}{\sqrt{2a} \cos(\Omega t) - \operatorname{ch}(bz)} e^{i(B^2 \beta \pm \rho_0)z},$$

где  $\beta = \rho_1^2 + \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2$ ,  $b = \beta B^2 \sqrt{8a(1-2a)}$ ,  $\Omega = 2B\sqrt{(1-2a)|\beta/k_2|}$ , константа  $B$  задает пространственно-временной масштаб бризера, а  $\beta k_2 < 0$ . При  $a < 1/2$   $A_{\pm}(z, t)$  описывает бризеры Ахмедиева, при  $a > 1/2$  – солитоны Кузнецова–Ма, а в пределе  $a \rightarrow 1/2$  – рациональные солитоны [5, 6].

Найденные решения показывают, что в изотропной гиротропной нелинейной среде могут распространяться эллиптически поляризованные волны, степень эллиптичности  $M(z, t) = (|A_+|^2 - |A_-|^2) / (|A_+|^2 + |A_-|^2)$  эллипса поляризации которых остается постоянной и равной  $-\rho_1/\sigma_2$ , а угол поворота  $\phi = 0.5 \operatorname{Arg}\{A_+^* A_-$  его главной оси возрастает с ростом  $z$ :  $\phi = \rho_0 z$ . Ранее неизвестные частные решения также представляют интерес с точки зрения возможных приложений.

#### Список литературы

1. Biswas A., Milovic D., Matthew E. Mathematical theory of dispersion-managed optical solitons. Springer, 2010.
2. Abdullaev F., et al. Optical Solitons. Springer, 2014.
3. Макаров В.А., Петникова В.М., Шувалов В.В. // Квантовая электроника. 2016. 46(6). 578.
4. Makarov V.A., Petnikova V.M., Shuvalov V.V. // Opt. Express. 2014. 22(22), 26607.
5. Kibler B., et al. // Scientific Reports. 2012. 2. 463.
6. Kibler B., et al. // Nature Physics. 2010. 6(10). 790.

В.А. СКОБНИКОВ, А.А. ГОРОДЕЦКИЙ<sup>1,2</sup>, М.С. КУЛЯ

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

<sup>1</sup>*Университет Ланкастера, Бирмингем, Великобритания*

<sup>2</sup>*Институт Кокрофта, Чешир, Великобритания*

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОГЕРЕНТНОСТИ ИСТОЧНИКА ИМПУЛЬСНОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ**

В работе продемонстрирован результат численного моделирования измерения когерентных свойств терагерцового излучения, полученного с помощью среды с квадратичной нелинейностью. Определен механизм учета когерентности при получении амплитудно-фазовых характеристики поля метод импульсной терагерцовой голографии с разрешением во времени.

V.A. SKOBNIKOV, A.A. GORODETSKY<sup>1,2</sup>, M.S. KULYA

*ITMO University, Saint-Petersburg*

<sup>1</sup>*Lancaster University, Birmingham, United Kingdom*

<sup>2</sup>*Cockcroft Institute, Cheshire, United Kingdom*

## **NUMERICAL SIMULATION OF THE SPATIAL COHERENCE OF OPTICAL RECTIFICATION BASED PULSED TERAHERTZ EMITTER**

In this work, we present the results of numerical simulations of terahertz (THz) radiation coherence measurements in the case of THz radiation produced by a media with a quadratic nonlinearity. The mechanism of the coherence accounting for fine amplitude and phase characteristics recovery by of pulsed terahertz time domain holography is proposed.

Терагерцовый (ТГц) спектр частот располагается между микроволновой и инфракрасной частью электромагнитного спектра, что соответствует области частот  $\sim 10^{11}$ – $10^{12}$  Гц. Эта область спектра привлекает к себе большой интерес исследователей и продолжает оставаться наиболее неосвоенной как в виде предметной области в фундаментальных исследованиях в оптике, так и в большом количестве смежных научных направлений и практических применений [1].

При генерации ТГц излучения с помощью нелинейного оптического кристалла пространственное распределение фазовых характеристик



волнового фронта зависит от степени пространственной когерентности источника излучения. Таким образом, необходимо проводить оценку влияния когерентности, генерируемой ТГц волны при решении задач голографии, формирования изображения объектов, спектроскопии и томографии.

Был разработан метод численного моделирования измерения когерентности, генерируемой ТГц волны при ее распространении в пространстве, основанный на полной записи волнового поля в каждой точке с последующим численным расчетом его распространения в заданную плоскость [2-4]. Для моделирования поведения источника излучения в фазовое распределение исходного поля происходит добавление случайного шума, отвечающего за влияние частичной когерентности. После чего происходит распространение волнового фронта на заданное расстояние. Функция, определяющая шумовой сигнал меняет значения на каждой итерации. Таким образом, формируется ансамбль распределений поля, где каждому элементу соответствует конкретный вклад частичной когерентности источника. Каждое распределение можно рассматривать в качестве отдельного импульса. Сравнение между собой распределений двух импульсов представляет собой наблюдение влияния временной когерентности на излучение. Для решения задач разрешенной во времени терагерцовой спектроскопии наличие временной когерентности является очевидным.

Для определения степени пространственной когерентности используется метод импульсной терагерцовой голографии. По полученной таким образом голограмме можно измерить пространственную когерентность излучения по фазовым портретам для каждой спектральной составляющей.

#### *Список литературы*

1. Зиновьев Н.Н. Терагерцовая когерентная спектроскопия и томография. <http://www.ioffe.ru/LNEPS/winter/handouts2005/zinovev.pdf>.
2. Petrov N.V., et al. Application of Terahertz Pulse Time-Domain Holography for Phase Imaging // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2016. V.6. No 3. P.464-472.
3. Kulya M.S., et al. Influence of raster scan parameters on the image quality for the THz phase imaging in collimated beam with a wide aperture. //Journal of Physics: Conference Series. 2014. V.536. No 1. P.012010.
4. Balbekin N.S., et al. The Modeling Peculiarities of Diffractive Propagation of the Broadband Terahertz Two-dimensional Field. // Physics Procedia. 2015. V.73. P.49-53.

К.Н. АЛЕКСЕЕВ, Е.В. БАРШАК, М.А. ЯВОРСКИЙ  
*Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь*

## **ВЫСШИЕ РЕЗОНАНСНЫЕ МОДЫ СКРУЧЕННЫХ АНИЗОТРОПНЫХ ВОЛОКОН**

В работе получены аналитические выражения для резонансных мод с азимутальным числом  $m > 1$  и соответствующих постоянных распространения скрученных слабо анизотропных волокон с крутильными механическими напряжениями (КМН).

C.N. ALEXEYEV, E.V. BARSHAK, M.A. YAVORSKY  
*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol*

## **HIGHER-ORDER RESONANCE MODES OF TWISTED ANISOTROPIC FIBERS**

Analytical expressions for resonance modes with the azimuthal number  $m > 1$  and the corresponding propagation constants of twisted weakly anisotropic fibers with torsional mechanical stress (TMS) were established.

Скрученные оптические волокна привлекают внимание исследователей значительными возможностями своего применения. Так, в работе [1] был предложен высокоэффективный метод генерации радиально и азимутально поляризованных векторных пучков с помощью скрученных слабо анизотропных волокон. Это возможно благодаря гибридизации мод с азимутальным числом  $m = 1$  скрученных волокон, представленными двумя циркулярно поляризованными оптическими вихрями (ОВ) с единичными топологическими зарядами, радиально и азимутально поляризованными модами [2], вблизи резонансных точек за счет малого возмущения (рис. 1).

В то же время известно [3], что при определенных условиях моды циркулярного оптически изотропного скрученного волокна с КМН с  $m > 1$  представляют собой четыре циркулярно поляризованных ОВ,  $|1, m\rangle, |-1, m\rangle, |-1, -m\rangle, |1, -m\rangle$ , топологического заряда  $m$ . Простой анализ спектра их постоянных распространения показывает, что при определенных значениях шага скрутки происходит пересечение некоторых спектральных ветвей (см. рис. 2, пунктирные линии). В таких резонансных точках имеет место вырождение уровней ОВ и, как

следствие, их неустойчивость даже относительно малых внешних возмущений. Таким образом, целью данной работы является получение структуры  $m > 1$  мод скрученных волокон с КМН со слабой одноосной анизотропией материала волокна вблизи резонанса.

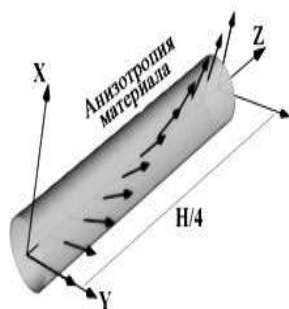


Рис. 1. Модель скрученного анизотропного волокна с КМН

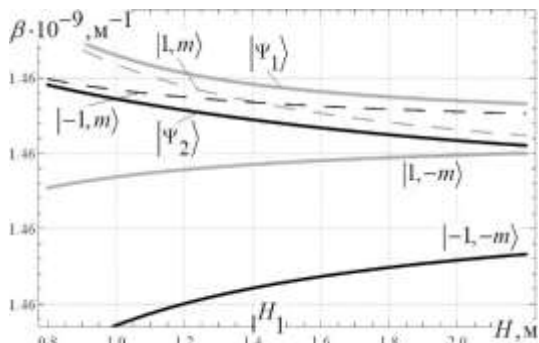


Рис. 2. Зависимость постоянных распространения мод невозмущенного и возмущенного волокна от шага скрутки

Используя теорию возмущений, получаем выражения для мод вблизи резонансного значения шага скрутки  $H = H_1$  (см. рис. 2):

$$|\Psi_1\rangle = \cos \alpha e^{-iqz} |1, m\rangle + \sin \alpha e^{iqz} |-1, m\rangle, \quad |\Psi_2\rangle = \sin \alpha e^{-iqz} |1, m\rangle - \cos \alpha e^{iqz} |-1, m\rangle,$$

где  $q = 2\pi/H$ . Видно, что моды имеют гибридную структуру: состоят из двух ОВ с противоположными знаками циркулярной поляризации и одинаковыми значениями топологического заряда  $m$ . Распределение энергии между парциальными полями определяется параметром  $\alpha$ , зависящем от отношения величины линейной анизотропии и близости шага скрутки к резонансному значению. Из рис. 2 хорошо видно, что слабая анизотропия снимает случайное вырождение спектра невозмущенного волокна и приводит к расталкиванию постоянных распространения. Отметим, что ценность полученных выражений состоит в том, что они позволяют аналитически исследовать эволюцию в волокне практически важных типов оптических полей.

#### Список литературы

1. Barshak E.V., Alexeyev C.N., et. al // J. Opt. 2013. V.15. 125707.
2. Alexeyev C.N., Volyar A.V., et. al // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2008. V.10. 095007.
3. Alexeyev C.N., Barshak E.V., et. al // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2009. V.11. 094011.

И.О. ЗОЛОТОВСКИЙ, В.А. ЛАПИН, Д.И. СЕМЕНЦОВ  
*Ульяновский государственный университет*

## **МОДУЛЯЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В НЕОДНОРОДНОМ СВЕТОВОДЕ**

Исследованы условия возникновения, область существования, и другие характеристики модуляционной неустойчивости волновых пакетов, распространяющихся в нелинейном волоконном световоде с экспоненциальной зависимостью дисперсии от длины.

I.O. ZOLOTOVSKII, V.A. LAPIN, D.I. SEMENTSOV  
*Ulyanovsk State University*

## **MODULATION INSTABILITY OF WAVE PACKETS THROUGH AN INHOMOGENEOUS FIBER**

The conditions of occurrence, the region of existence, and other characteristics of the modulation instability of wave packets propagating in a nonlinear medium with a running refractive index wave are researched.

Модуляционная неустойчивость (МН) – рост малых гармонических возмущений непрерывной волны – эффект, характерный для многих нелинейных систем, поддерживающих распространение локализованных волн, природа которого связана с совместным действием нелинейных и дисперсионных эффектов [1].

Динамика временной огибающей ВП может быть описана следующим уравнением для амплитуды огибающей [2,3,4]:

$$i \frac{\partial A}{\partial z} - \frac{d_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial \tau^2} + i\gamma |A|^2 A = 0, \quad (1)$$

где  $\tau = t - z/v_g$  – время в бегущей системе координат,  $v_g = (\partial\omega/\partial\beta)_{\omega_0}$  – групповая скорость волнового пакета,  $d_2 = (d^2\beta/d\omega^2)$  – параметр дисперсии групповых скоростей,  $\gamma$  – параметр нелинейности.

На рис. 1 представлены результаты численного решения методом пошаговых преобразований Фурье [1] уравнения (1), определяющего динамику распространения модулированного сигнала вида:

$$A(0, \tau) = \sqrt{P_0} [1 + 0.01 \cos(\Omega_{\text{mod}} \tau)] \quad (2)$$

при следующих значениях параметров световода: дисперсии групповых скоростей  $d_{20} = -1 \cdot 10^{-26}$  с<sup>2</sup>/м, начальной мощности  $P_0 = 1$  Вт, параметре нелинейности  $\gamma = 10^{-2}$  (Вт·м)<sup>-1</sup>, параметре неоднородности  $b = (0; 5) \cdot 10^{-3}$  м<sup>-1</sup> и частоте модуляции  $\Omega_{\text{mod}} = \omega_m$ , где  $\omega_m$  – частота отстройки, при которой интегральный инкремент усиления достигает максимума. Из приведенных зависимостей видно, что в случае неоднородного световода с небольшим значением параметра неоднородности процесс уширения импульсов проявляется значительно слабее, чем в случае однородного световода, где процесс сжатия импульсов циклически сменяется процессом их уширения, благодаря данному эффекту можно получить импульсы со значительно более высокой степенью сжатия.

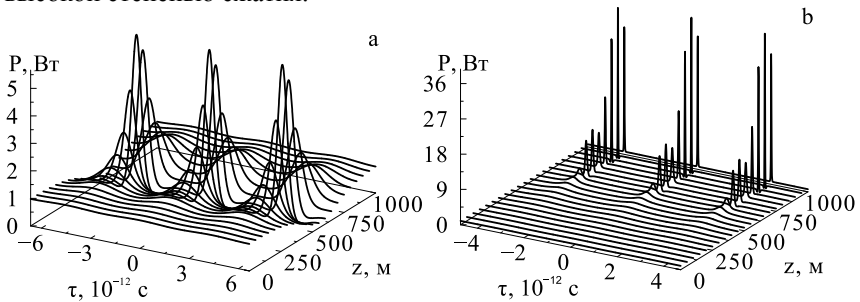


Рис. 1. Временные профили модулированной волны в зависимости от длины световода  $z$ , при параметре неоднородности  $b = (0; 5) \cdot 10^{-3}$  м<sup>-1</sup> (а) и (б)

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (в рамках проекта № 14.Z50.31.0015 и Государственного задания) и Российского Научного Фонда (проект 16-42-02012).

#### Список литературы

1. Agrawal G. Nonlinear fiber optics. Springer, 2007.
2. Ахметшин У.Г., Богатырев В.А., Сенаторов А.К., Сысолятин А.А., Шалыгин М.Г. // Квантовая электроника. 2003. Т.33. №3. С.265–267.
3. Золотовский И. О., Лапин В.А., Семенцов Д.И. // Радиотехника и электроника. 2013. Т.58. №1. С.73–79.
4. Zolotovskii I. O., Lapin V. A., Sementsov D. I. // Physics of Wave Phenomena. 2013. V.21. No. 1. P.20-30.

А.О. КОВАЛЕВА, К.Н. АЛЕКСЕЕВ, А.Ф. РЫБАСЬ,  
Н.В. ПЕТРОВ<sup>1</sup>, И.А. ШЕВКУНОВ<sup>1</sup>  
*Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь*  
<sup>1</sup>*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **ЭВОЛЮЦИЯ СВЕТА В ЦИРКУЛЯРНОМ МАССИВЕ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН**

Исследование эволюции света в циркулярном массиве эллиптических волокон показало, что ориентация осей эллипсов линейно зависит от углового положения волокна в массиве и создает полуцелое число  $p$  полных вращений по его контуру. Определено, что свойства такого массива, позволяют генерировать цилиндрические векторные пучки ТЕ и ТМ типов, обусловленных ориентацией линейной поляризации, падающего пучка света.

A.O. KOVALYOVA, C.N. ALEXEYEV, A.F. RUBASS,  
N.V. PETROV<sup>1</sup>, I.A. SHEVKUNOV<sup>1</sup>  
*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol*  
<sup>1</sup>*ITMO University, Saint-Petersburg*

## **EVOLUTION OF LIGHT IN A CIRCULAR ARRAY OF OPTICAL FIBERS**

We have studied evolution of light in a circular array of elliptical fibers. Shown that the orientation of ellipses' axes linearly depends on the angular position of the fiber in the array and makes an half-integer number  $p$  of full rotations while tracing along its contour. It was determined that the properties of such an array can generate cylindrical vector beams of TE and TM types, depends on the orientation of linear polarization of the incident beam.

В работах [1-4] было показано, что циркулярные массивы оптических волокон применяются в системах и устройствах связи, позволяющих контролировать состояния орбитального углового момента, генерировать цилиндрические векторные пучки, а супермоды циркулярных массивов оптических волокон, представляют собой дискретные оптические вихри. Однако, ранее решаемые задачи, были действительны только для массивов с нечетным числом волокон  $N$  [5], в то время как на практике многожильные волокна содержат только четное число эллиптических жил.

Целью нашей работы явилось изучение эволюции света в циркулярном массиве, с четным числом  $N$  эллиптических волокон, с полуцелым числом  $p$  направления вращения анизотропии.

Мы изучили преобразование дискретных световых пучков в циркулярных массивах эллиптических волокон, в которых ориентация осей эллипсов линейно зависит от углового положения волокна в массиве и создает полу-целое число  $p$  полных вращений, вдоль его контура. Изучение преобразований свойств такого массива показало, что он может генерировать цилиндрические векторные пучки ТЕ и ТМ типов.

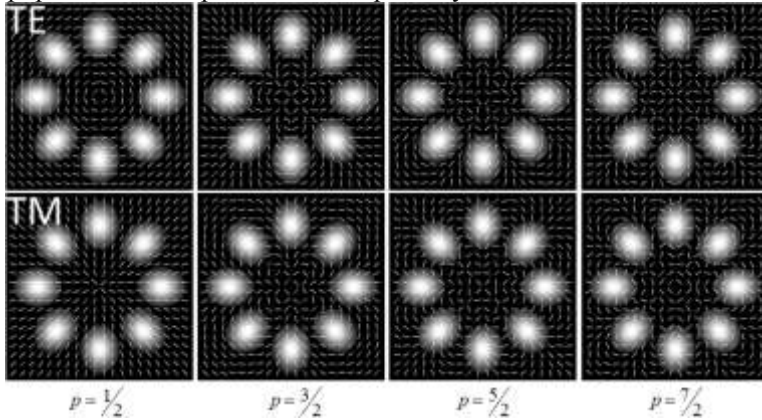


Рис. 1. Интенсивность и поляризация цилиндрических векторных пучков ТЕ и ТМ типа, генерируемых циркулярным массивом оптических волокон

Мы показали, что тип генерируемого пучка зависит от ориентации линейной поляризации падающего пучка. Таким образом, круговой массив эллиптических волокон позволяет контролировать состояние поляризации по типу генерируемого цилиндрического векторного пучка. Получено, что такие массивы могут изменять топологический заряд входящего дискретного оптического вихря.

Работа выполнена в рамках Проекта Программы развития ФГАОУ ВО "КФУ имени В.И. Вернадского" сеть «Академическая мобильность молодых ученых России – АММУР» ГСУ/2016/3.

#### *Список литературы*

1. Hudgings J., Molter L., Dutta M. // IEEE J. Quantum Electron. 2000. 36. P.1438-1444.
2. Yan Y., Wang J., Zhang L., et al. // Opt. Lett. 2011. 36. P.4269-4271.
3. Alexeyev C.N., Volyar A.V., Yavorsky M.A. // Phys. Rev.A. 2009. 80. 063821.
4. Yu Y.F., et al. // Opt. Express. 2010. 18. 21651-21662.
5. Alexeyev C.N. // Phys. Rev. A. 2012. 86. 063830.

С.И. ХАЛИЛОВ, А.Э. ИБРАГИМОВ,  
А.Ф. РЫБАСЬ, Я.Е. АКимоВА

*Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СОБСТВЕННОГО МОДОВОГО СОСТАВА ИЗЛУЧЕНИЯ ВОЛОКНА ДЛЯ $V=3.8$

Программа, написанная на языке программирования C# позволяет строить: распределение интенсивности, азимут, эллиптичность, а также тонкую поляризационную структуру как одной моды, так и из суперпозиции мод волокна с волноводным параметром  $V=3.8$ .

S.I. HALILOV, A.E. IBRAGIMOV, A.F. RUBASS,  
Ya.E. AKIMOVA

*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol*

## MODELING YOUR OWN MODE COMPOSITION OF THE RADIATION OF THE FIBERS AT $V=3.8$

The program is written in C# programming language allows calculate: the distribution of the intensity, azimuth, ellipticity, and fine polarizations structure as one mode, and a superposition of the mod's of the fiber with the waveguide parameter  $V=3.8$ .

Как было показано в работе [1], пучки Лаггера-Гаусса имеющие собственный орбитальный угловой момент (ОУМ) значение которого совпадает с величиной топологического заряда (ТЗ), способны образовывать отдельные информационные каналы в волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС). Для того чтоб через волокно можно было пропустить оптический вихрь, было взято волокно с  $V=3.8$ . Тогда согласно численному решению характеристического уравнения [2, с. 273], в таком волокне реализовывалось 12 мод:  $HE_{11}^x, HE_{11}^y$  или  $HE_{11}^+, HE_{11}^-, TE_{01}, TM_{01}, HE_{21}^{ev}, HE_{21}^{odd}, HE_{31}^{ev}, HE_{31}^{odd}, EH_{11}^{ev}, EH_{11}^{odd}, HE_{12}^{ev}, HE_{12}^{odd}$ .

Поэтому, целью работы явилось: написать программу, которая будет моделировать модовые комбинации, а также позволит контролировать длину волокна, длину волны и параметры волокна. А также дополнительно смоделировать собственные вихревые моды маломодового волокна в циркулярно поляризованном базисе.



Частными решениями векторного волнового уравнения [2, с. 525] в циркулярно поляризованном базисе, для осесимметричных градиентных волокон, является 2 типа вихрей: устойчивые  $CV_{11}^{++}, CV_{11}^{--}$  ( $CV \Rightarrow HE_{21}^{ev} \pm iHE_{21}^{odd}$  на рис. 2) и неустойчивые  $IV_{11}^{+}, IV_{11}^{-}$  (рис. 1, рис. 3,  $IV \Rightarrow TE_{01} \pm iTM_{01}$  на рис. 2) [3].

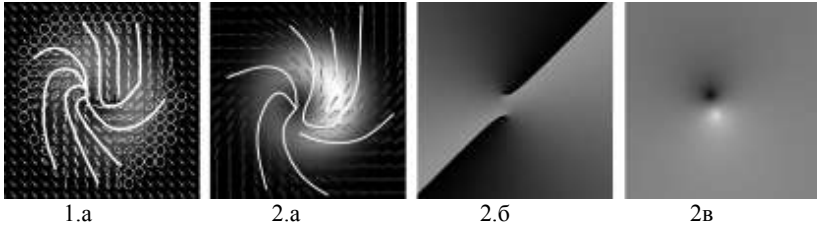


Рис. 1. Эксперимент (1) и моделирование (2) распределения интенсивности и поляризации (а), азимут (б) и эллиптичность поля волокна (в) при  $Z=0.21$  м,  $\lambda=650$  нм,  $p=3.5$  мкм, с весовыми коэффициентами:  $IV = 2.3$ ,  $HE_{11} = 0.7$

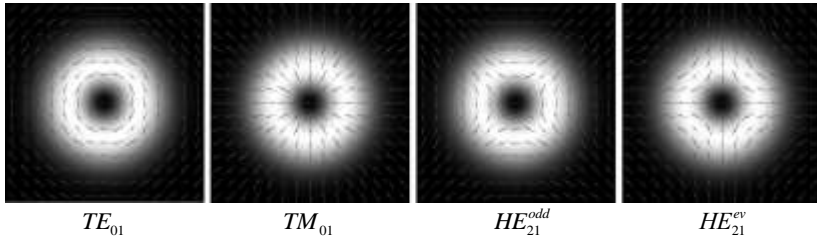


Рис. 2. Моделирование векторного распределения поляризации, при  $Z=0.45$  м,  $\lambda=650$  нм,  $p=3.5$  мкм, с весовыми коэффициентами равные 1

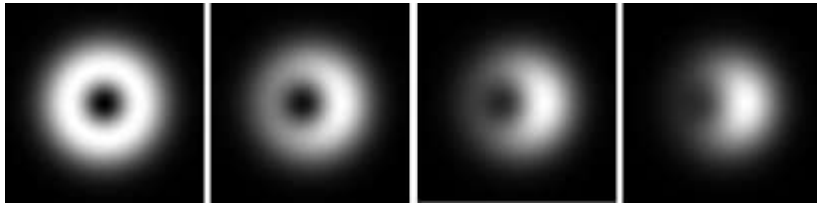


Рис. 3. Моделирование распределение интенсивности неустойчивого  $IV$  вихря смещенного к периферии  $HE_{11}$  модой, при  $Z=0.5$  м,  $\lambda=650$  нм,  $p=3.5$  мкм, с весовыми коэффициентами:  $IV = 5$ ,  $HE_{11} = 0...3$

*Список литературы*

1. Halilov S.I., Piyasova A.A., Rubass A.F., Pogrebnaya A.O. // JPCS. 2016. V.737.
2. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов. М.: Радио и связь, 1987.
3. Воляр А.В., Фадеева Т.А. // Письма в ЖТФ. 1996. Т.22. Вып.17.

М.М. ВЕКШИН, В.А. НИКИТИН, Н.А. ЯКОВЕНКО

*Кубанский государственный университет, Краснодар*

## **ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ДВУХСЛОЙНЫХ ВОЛНОВОДНЫХ СТРУКТУР В СТЕКЛЕ**

Представлены результаты физико-математического моделирования технологических процессов формирования интегрально-оптических волноводов в два вертикально расположенных друг относительно друга слоя путем поэтапных операций термического ионного обмена  $Ag^+ \leftrightarrow Na^+$  и электростимулированной миграции ионов  $Ag^+$  в стекле К-8.

M.M. VEKSHIN, V.A. NIKITIN, N.A. YAKOVENKO

*Kuban State University, Krasnodar*

## **PHYSICAL-MATHEMATICAL MODELING OF FABRICATION TECHNOLOGY OF TWO-LAYER WAVEGUIDES STRUCTURES IN GLASS**

Physical-mathematical modeling results of technological processes of integrated-optic glass waveguides fabrication in two shifted one relative to other in vertical direction layers by step-by-step techniques of thermal ion exchange  $Ag^+ \leftrightarrow Na^+$  and field-assisted ion  $Ag^+$  migration in glass K-8 are presented.

Целью работы является физико-математическое моделирование технологических процессов формирования интегрально-оптических волноводов в двух слоях, смещенных друг относительно друга в вертикальном направлении, путем многоэтапных комбинаций термического ионного обмена  $Ag^+ \leftrightarrow Na^+$  в стекле К-8 из расплава солей  $AgNO_3:NaNO_3$  и электростимулированной миграции ионов  $Ag^+$  для заглабления каналов. Актуальность исследования обусловлена перспективами использования 3D волноводных схем различного функционального назначения.

Схема четырехэтапного процесса формирования волноводов в два смещенных друг относительно друга в вертикальном направлении слоя представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема технологии формирования двухслойных интегрально-оптических схем

Для определения технологических особенностей процесса изготовления волноводов определялось формирующее волноводное распределение концентрации ионов  $Ag^+$  в стекле путем решения уравнения диффузии.

Расчеты проводились с целью подбора технологических параметров формирования волноводов с близкими параметрами, с рабочей длиной волны 1.55 мкм. Результаты расчетов показали, что для этой цели концентрация расплава для второго ионного обмена должна быть в два раза ниже, чем для первого; ширина щели в маске для первого этапа – 2 мкм, для третьего этапа – 5 мкм. Результаты расчетов профиля показателя преломления волноводов и их модовых полей показаны на рис. 2.

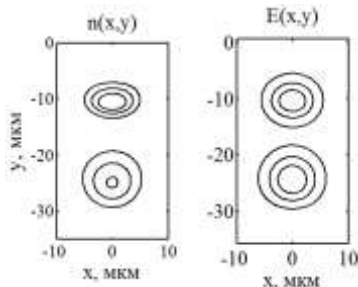


Рис. 2. Профиль показателя преломления заглабленных в 2 слоя волноводов –  $n(x,y)$  и распределение поля мод волноводов –  $E(x,y)$

Эффективные размеры электрического поля моды нижнего волновода по горизонтальной и вертикальной координате – 10.4 мкм и 9.6 мкм, соответственно. Для верхнего волновода соответствующие размеры имеют значения 9.5×8.2 мкм. Расстояние между волноводами – 14 мкм. Результаты расчетов свидетельствует о технологической возможности изготовления таких интегрально-оптических схем в стекле К-8.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-48-230392 p\_a.

А.Д. БЕЗПАЛЫЙ, В.М. ШАНДАРОВ

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники*

**ОПТИЧЕСКОЕ ФОРМИРОВАНИЕ  
ВОЛНОВОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В НИОБАТЕ ЛИТИЯ  
С ФОТОРЕФРАКТИВНЫМ ПОВЕРХНОСТНЫМ СЛОЕМ**

Экспериментально продемонстрировано формирование канальных оптических волноводов в легированном медью приповерхностном слое образца ниобата лития путем поточечного экспонирования.

A.D. BEZPALY, V.M. SHANDAROV

*Tomsk State University of Control System and Radioelectronics*

**OPTICAL FORMATION OF WAVEGUIDE ELEMENTS  
IN LITHIUM NIOBATE  
WITH PHOTOREFRACTIVE SURFACE LAYER**

Formation of channel optical waveguides by point-by-point exposure of copper doped surface layer of lithium niobate sample has been experimentally demonstrated.

Кристаллы ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ), легированные некоторыми примесями, например железом (Fe) и медью (Cu), представляют существенный интерес благодаря фоторефрактивным свойствам [1, 2], которые позволяют формировать фазовые дифракционные решетки и более сложные оптические элементы лазерным излучением, что важно в плане создания оптоэлектронных и полностью оптических приборов фотоники [3].

Целью данной работы является исследование формирования и характеристик канальных волноводных элементов в образцах  $\text{LiNbO}_3$  с легированием поверхностной области фоторефрактивными примесями.

Источником света при формировании волноводных каналов служил  $\text{YAG:Nd}^{3+}$  лазер, работающий в непрерывном режиме на длине волны  $\lambda=532$  нм. Канальные волноводы (рис.1) формировались путем последовательной поточечной экспозиции лазерным пучком, сфокусированным сферической линзой с фокусным расстоянием  $\sim 30$  мм, на поверхность образца  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$  Y-среза с размерами  $30 \times 3 \times 15$  мм<sup>3</sup> по осям X, Y, Z. Мощность излучения составила 10 мВт при диаметре пятна 12 мкм по половинному уровню интенсивности. Расстояние между центрами точек составило 25 мкм.

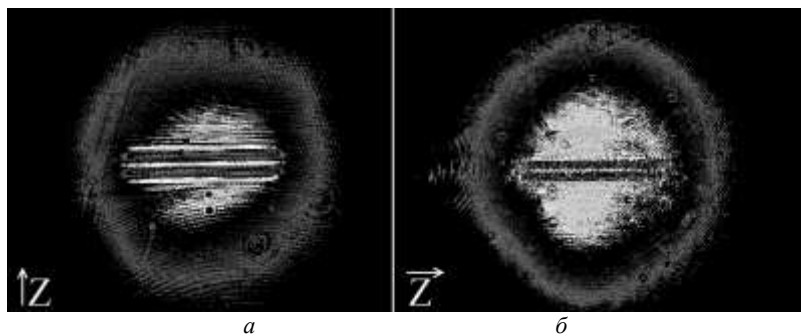


Рис. 1. Световые картины при оптическом зондировании экспонированных областей: структура, ориентированная перпендикулярно полярной оси кристалла (*a*); структура, ориентированная вдоль полярной оси кристалла (*b*)

Рис. 1 иллюстрирует световые картины в ближней зоне, при зондировании образца параллельным пучком с диаметром 0,55 мм,  $\lambda=633$  нм и  $P=1$  мВт. Рис. 1а показывает картину светового поля при зондировании области, экспонированной перпендикулярно оптической оси кристалла. Две параллельные темные полосы с длиной 375 мкм в центральной части соответствуют полоскам с пониженным показателем преломления. Расстояние между центрами полос оценивалось в 40 мкм. Светлая полоса между ними – волноводная область.

Важно отметить, что при ориентации световой полосы вдоль оптической оси, формирование фоторефрактивных фазовых элементов считается запрещенным, однако поточечное экспонирование поверхности кристалла узким световым пучком показывает, что такая возможность появляется (рис. 1б).

Подобные структуры допускают многократную оптическую реконфигурацию топологии, что представляет интерес в плане их использования в полностью оптических устройствах фотоники.

Работа выполнена в рамках проектной части Госзадания Минобрнауки РФ (проект №3.878.2014/К).

#### *Список литературы*

1. Petrov M.P., Stepanov S.I., Khomenko A.V. Photorefractive Crystals in Coherent Optical Systems Berlin: Springer-Verlag, 1991.
2. Kip D. // Appl. Phys. B. 1998. V.67. P.131-150.
3. Kivshar Y.S., Agrawal G.P. Optical Solitons: From Fibers to Photonic Crystals. Amsterdam: Academic Press, 2003.

М.М. ВЕКШИН, Н.А. ЯКОВЕНКО  
*Кубанский государственный университет, Краснодар*

## **ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПОЛЯРИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ ЭВОЛЮЦИИ МОДЫ ВОЛНОВОДА В СТЕКЛЕ**

Представлены результаты разработки в стекле интегрально-оптического преобразователя поляризации оптического излучения на основе продольно-неоднородного волновода с асимметричной формой поперечного сечения. Устройство преобразует линейно-поляризованное излучение в циркулярно-поляризованное. Принцип работы основан на эволюции моды волновода.

M.M. VEKSHIN, N.A. YAKOVENKO  
*Kuban State University, Krasnodar*

## **INTEGRATED-OPTIC POLARIZATION CONVERTER BASED ON GLASS WAVEGUIDE MODE EVOLUTION**

The results of design of integrated-optic polarization converter in glass, based on longitudinally variant waveguide with asymmetric cross-section, are presented. The converter transforms linear polarized waves to waves with circular polarization. The operation principle is based on waveguide mode evolution.

Целью настоящей работы является разработка интегрально-оптической схемы в стекле – волноводного преобразователя поляризации, преобразующего линейную ТЕ- или ТМ-поляризацию излучения в циркулярную.

Схема преобразователя показана на рис. 1. Преобразователь поляризации представляет собой волновод с асимметричной формой поперечного сечения канала, в виде эллипса, повернутого на угол  $45^\circ$  относительно осей  $x$  и  $y$  в декартовой системе координат, ориентированной относительно ребер подложки, в которой волновод сформирован. Часть поверхности над волноводом покрыта диэлектрическим слоем с показателем преломления, равным показателю преломления подложки. В той части поверхности над волноводом, где пленка отсутствует, покровной областью является воздушная среда. Пленка расположена под небольшим углом относительно продольной геометрической оси волновода, поэтому, в зависимости от продольной координаты (оси  $z$ ), она покрывает либо полностью всю поверхность над

каналом, либо часть этой поверхности, либо она находится вне зоны волновода.

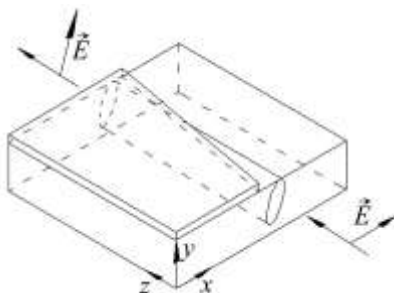


Рис. 1. Схема волноводного преобразователя поляризации

Волновод с такой формой поперечного сечения может быть изготовлен в стекле по технологии ионного обмена с селективным заглублением канала [1, 2], а также с применением других технологий.

Принцип работы преобразователя поляризации основан на особенностях поляризации мод асимметричного волновода в двух его конфигурациях – с воздушной покровной средой и покрытого пленкой. Расчет первой фундаментальной моды волновода показывает, что мода линейно поляризована. В первой конфигурации мода поляризована параллельно к границе раздела подложки с воздушной средой. Во второй конфигурации поляризация моды ориентирована вдоль большой оси эллипса.

Схема преобразователя поляризации, показанная на рис. 1, основана на эволюции моды волновода, так как покровная среда определяет ее поляризацию. Волноводная схема обладает свойствами четвертьволновой пластинки. Результаты расчета эволюции моды: поляризационное преобразование  $TE_0$ -моды в циркулярно-поляризованное излучение сопровождается вносимыми потерями энергии оптического излучения 0.5 дБ при длине устройства 20 мм.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-48-230392 p\_a.

#### *Список литературы*

1. West B.R., Madasamy P., Peyghambarian N., Honkanen S. Modeling of ion-exchanged waveguide structures// *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2004. V.347. P.18-26.
2. Jordana E., Ghibaudoa E., Boucharda A., Blanc-Jamonb M.-F., Royerb F., Broquin J.-E. Design of a waveguide with optics axes tilted by 45° and realized by ion-exchange on glass // *Proc. SPIE*. 2016. V.9750. P.975009.

Н.Д. ВОРЗОБОВА, П.П. СОКОЛОВ, В.О. ВЕСЕЛОВ  
*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **ФОРМИРОВАНИЕ И СВОЙСТВА ГИБРИДНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР**

Рассмотрены процессы формирования гибридных полимерных периодических структур. Определены условия получения поверхностного рельефа на поверхности объемной решетки с модуляцией показателя преломления и его влияние на дифракционную эффективность, угловую селективность, светорассеяние. Предложены возможные применения гибридных структур.

N.D. VORZOBOVA, P.P. SOKOLOV, V.O. VESELOV  
*ITMO University, Saint-Petersburg*

## **FORMATION AND PROPERTIES OF HYBRID PERIODIC STRUCTURES**

The processes of hybrid polymeric periodic structures formation are considered. The conditions for obtaining the maximum surface relief on the surface of the volume grating with modulation of the refractive index and its influence on the diffraction efficiency, angular selectivity and light scattering are determined. The possible using of hybrid structures is proposed.

Процессы формирования периодических структур в фотополимерных материалах и их свойства являются предметом широких исследований, которые можно разделить на два основных направления. Первое направление связано с изучением объемных структур с модуляцией показателя преломления, формируемой в результате фотоиницированного массопереноса в интерференционном поле [1, 2]. Интерес к таким структурам определяется возможностью получения высокой дифракционной эффективности (ДЭ) и высокой угловой селективности при высоких пространственных частотах записи. Второе направление связано с изучением рельефных структур, при этом, основной задачей является получение наибольшей глубины рельефа. Как следует из литературы [3], наибольшая глубина рельефа решеток, записанных в фотополимеризующихся композициях, достигается на низких пространственных частотах, при относительно больших периодах – десятки микрон, при этом, рельефные решетки рассматриваются как тонкие и не обеспечивают высоких дифракционных свойств.



В данной работе исследованы гибридные структуры (ГС) – объемные пропускающие решетки с модуляцией показателя преломления, на поверхности которых формируется рельефная структура с периодом единицы микрон. Процессы формирования и свойства гибридных структур практически не исследованы [4]. При проведении экспериментов периодические ГС с периодом 2 - 3 мкм записывали в интерференционном поле в попутных пучках с использованием двухкомпонентных акрилатных композиций [5]. Исследовано влияние на ДЭ, угловую селективность и светорассеяние экспозиционных параметров и способа получения структуры. Рассмотрены процессы формирования ГС в толстых слоях (до 100 мкм) результате экспонирования и экспонирования с последующим вымыванием неполимеризованного материала. Определены условия, при которых на поверхности объемной пропускающей решетки с модуляцией показателя преломления формируется решетка со значительным поверхностным рельефом. Показано, что наибольшая глубина рельефа достигается на начальном этапе формирования структуры и уменьшается при увеличении длительности экспонирования. Решетка поверхностного рельефа занимает промежуточное положение между тонкой и объемной. Рассмотрены возможные механизмы формирования рельефной решетки. Установлено, что формирование рельефной решетки на поверхности объемной решетки приводит к существенному уширению контура угловой селективности. При этом, в пределах угловой селективности объемной компоненты ДЭ достигает 80%, при отклонении угла падения восстанавливающего излучения от угла Брэгга уменьшается незначительно (в 1.5 - 2 раза) и сохраняется в диапазоне углов падения  $80^{\circ}$  –  $100^{\circ}$  (полуширина контура угловой селективности). Полученные результаты могут быть использованы для создания дифракционных солнечных концентраторов, позволяющих использовать излучение в широком диапазоне углов падения, при преимуществе существенного упрощения процессов получения элементов, относительно существующих [6], а также в защитных технологиях, базирующихся на визуальном контроле.

*Список литературы*

1. Mackey D., O'Reilly P., et. al. // J. Opt. Soc. Am.A. 2016. V.33, No 5.P.920-929.
2. Close C.E., Gleeson M. R, et. al. // J. Opt. Soc. Am. B. 2011. V.28, No 4. P.842-850.
3. Smirnova T. N., Sakhno O. V. // Optics and Spectroscopy. 2002. V.93. No 1. P.126-131.
4. Lucchetta D.E., Spagni P., et. al. // Optical Materials. 2015. V.42. P.366-369.
5. Burunkova Yu. E., Semjina S. A., et. al. // Optical Journal. 2008. V.75, No 10. P.54-58.
6. Akbari H., Naydenova I., et. al.// Applied Optics. 2014. V.53. No 7. P.1343-1363.

М.А. АНОХИНА<sup>1,2</sup>, С.Н. МЕНСОВ<sup>1,2</sup>, Ю.В. ПОЛУШТАЙЦЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского*

<sup>2</sup>*Институт металлоорганической химии им. Г.А. Разуваева РАН,  
Нижний Новгород*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ 2D СТРУКТУР В ФОТОПОЛИМЕРИЗУЮЩЕМСЯ СЛОЕ**

Исследована возможность использования нестационарных световых потоков в оптических методах одностадийного формирования неоднородных по показателю преломления полимерных 2D структур из фотополимеризующихся сред с нейтральным компонентом. Показано, что движением границ освещенности можно эффективно формировать градиенты показателя преломления на произвольных масштабах.

M.A. ANOKHINA<sup>1,2</sup>, S.N. MENSOV<sup>1,2</sup>, Yu.V. POLUSHTAYTSEV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod*

<sup>2</sup>*Razuvaev Institute of Organometallic Chemistry of RAS, Nizhny Novgorod*

## **USE OF NON-STATIONARY LIGHT TO CREATE 2D STRUCTURES IN THE PHOTOPOLYMERIZABLE LAYER**

The possibility to use non-stationary flows of light in optical methods of one-step formation of polymeric 2D structures with inhomogeneous refractive index from photopolymerizable media with neutral component is investigated. It is shown that the movement of luminance boundaries enables effective formation of the refractive index gradients on arbitrary scales.

Диэлектрические слои с неоднородным распределением показателя преломления находят широкое применение для создания планарных волноведущих структур, плоских элементов градиентной и дифракционной оптики. Современные фотомодифицируемые среды (фоторезисты, фотополимеризующиеся композиции) позволяют фотолитографическими методами создавать нано- и микроразмерные структуры с достаточно произвольной топологией, однако эти процессы многостадийны. В то же время, из ФПК с нейтральным компонентом (НК) за счёт неравновесных диффузионных процессов, стимулированных неоднородным излучением, за одну операцию могут быть созданы полимерные материалы с требуемым распределением концентрации НК.

Здесь реализуется механизм вытеснения нейтрального компонента на градиенте освещённости из областей с большей конверсией и накопление его в теневом участке. При различающихся значениях показателя преломления ( $n$ ) НК и полимера это позволяет создавать полимерные слои с заданным распределением  $n$ . Однако такой процесс перераспределения НК эффективно реализуется лишь на участках с большим градиентом освещённости, что характерно для записи периодических и квазипериодических структур. Для формирования 2D полимерных структур с более сложной топологией распределения  $n$  из ФПК с НК предлагается использовать нестационарные световые потоки.

Была разработана диффузионная модель, которая описывает процесс перераспределения компонентов в слое ФПК при иницировании полимеризации светом с заданным пространственно-временным распределением интенсивности. Исследованы процессы неоднородной фотополимеризации ФПК при перемещении с постоянной скоростью границы света и тени иницирующего излучения. Определена возможность вытеснения НК вдоль полимеризующегося слоя движением границы освещённости. Изучено влияние скорости сближения двух границ освещённости на эффективность формирования локальной области с повышенной концентрацией нейтрального компонента в слое ФПК (рис. 1 и 2). Показано, что локальное повышение концентрации НК может достигать 60 масс.% при её начальном содержании 10 масс.%. Проведены экспериментальные исследования по локализации НК в заданном участке слоя ФПК и оптическому формированию стабильных 2D-структур с заданным объёмным распределением показателя преломления в полимерном слое.

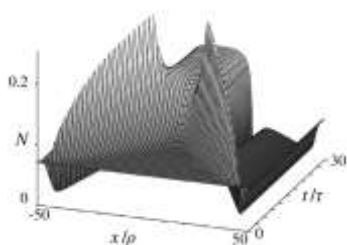


Рис. 1. Эволюция распределения концентрации НК при встречном движении границ освещённости

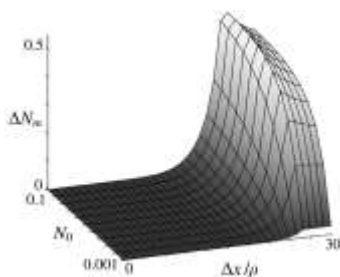


Рис. 2. Зависимость накопления НК от его исходного содержания и трассы перемещения границы

О.Н. ГАДОМСКИЙ, И.А. ЩУКАРЕВ  
*Ульяновский государственный университет*

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦВЕТНЫХ СВЕТОДИОДОВ НАНОСТРУКТУРНЫМ КОМПОЗИТНЫМ СЛОЕМ PMMA+Ag

Показано, что замена внешнего слоя в серийно выпускаемых цветных светодиодах на наноструктурный композитный слой с наночастицами серебра в полимерной матрице позволяет значительно, более чем в три раза, увеличить их эффективность, благодаря слабой зависимости потока фотонов из активной области светодиода от угла падения на внутреннюю поверхность композитного слоя.

O.N. GADOMSKY, I.A. SHCHUKAREV  
*Ulyanovsk State University*

## INCREASE IN EFFICIENCY OF COLORED LIGHT-EMITTING DIODES BY A NANOSTRUCTURAL COMPOSITE LAYER PMMA+Ag

It is shown that replacement of an external layer in serially let out color and white light-emitting diodes on a nanostructural composite layer with silver nanoparticles in a polymeric matrix allows considerably, more than three times to increase their efficiency, thanks to weak dependence of a photons flow from active area of a light-emitting diode from an incidence angle and localization photon effect.

Будем считать, что оптические свойства светодиода определяются оптическими свойствами верхнего слоя (слой ITO), а свет под различными углами падает с внутренней стороны светодиода с показателем преломления  $n_3 = 2.46$ . Как будет показано ниже, замена верхнего слоя в светодиоде на композитный слой PMMA+Ag приводит к повышению эффективности цветных светодиодов.

Пропускательную способность  $T_2^{(s)}(\theta)$  композитного слоя (среда 2, слой из PMMA+Ag) со стороны подложки (активная область светодиода) в случае s-поляризованных волн определим по следующей формуле:

$$T_2^{(s)} = \frac{S_1}{S_3} \frac{n_1 \operatorname{Re}(\cos \theta_1)}{n_3 \cos \theta} \Delta n_2^2 |t_{123}^{(s)}(\theta)|^2, \quad (1)$$

где  $n_1 = 1$  - показатель преломления среды 1 над внешним слоем светодиода,  $\theta$  - угол падения света, исходящего из активной области светодиода (среда 3),  $\theta_1$  - угол, в направлении которого фиксируется свет от светодиода в среде 1,  $\Delta n_2$  - область допустимых значений случайного показателя преломления композитного слоя ПММА+Ag, эта область определяется с помощью экспериментальных спектров отражения слоя [1],  $(S_1/S_3)$  - отношение площадей сечения пучков света в средах 1 и 3, соответственно. Область допустимых значений показателя преломления слоя  $\Delta n_2$  (среда 2) определим с помощью следующей формулы:

$$\Delta n_2 = \sqrt{\left(\frac{\lambda_1 \lambda_2}{2d_2(\lambda_2 - \lambda_1)}\right)^2 + \sin^2 \theta_R}, \quad (2)$$

где  $\lambda_1, \lambda_2$  - длины волн соседних интерференционных минимумов в спектре отражения слоя. Следуя экспериментальным данным работы [1],  $\lambda_1 \lambda_2 / [2d_2(\lambda_2 - \lambda_1)] = 0.36$ .

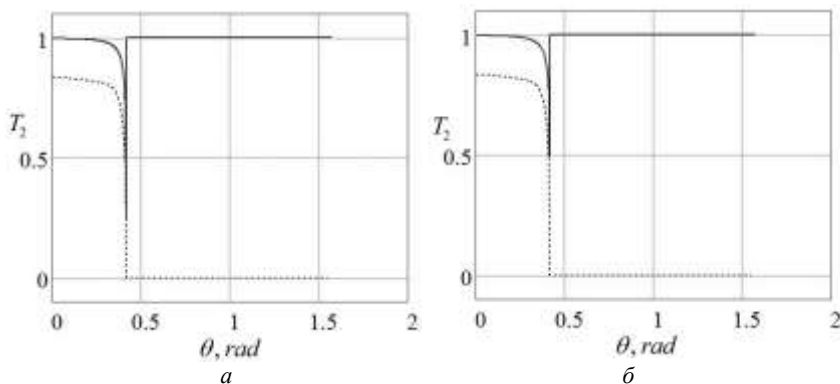


Рис. 1. Пропускательная способность композитного (ПММА+Ag) слоя в зависимости от угла падения света со стороны активной области светодиода. Пунктирной линией обозначена пропускательная способность слоя ИТО в серийном светодиоде. Толщина слоя ИТО и композитного слоя равна  $d_2 = 280$  нм,  $n_3 = 2.46$ ,  $n_1 = 1$ .  $\lambda = 530$  нм (а),  $\lambda = 700$  нм (б)

#### Список литературы

1. Gadomsky O.N., Stepin S.N., Katnov V.E., Zubkov E.G. // Journal of Applied Spectroscopy. 2013. V.80. P.726.

М.Е. ЧЕРНЯК<sup>1,2</sup>, Р.К. МОЖАЕВ<sup>1</sup>,  
С.А. СТАХАРНЫЙ<sup>3</sup>, А.В. МЕРКУЛОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

<sup>2</sup>ЭНПО «Специализированные электронные системы», Москва

<sup>3</sup>ООО «Технологии органической и печатной электроники», Москва

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ OLED-ДИОДОВ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ГАММА-КВАНТОВ И НЕЙТРОНОВ**

Приведены постановка задачи исследования изменений оптических и электрических параметров OLED-диодов при радиационном воздействии нейтронов и гамма-квантов.

M.E. CHERNIAK<sup>1,2</sup>, R.K. MOZHAEV<sup>1</sup>,  
S.A. STAKHARNIY<sup>3</sup>, A.V. MERKULOV<sup>3</sup>

<sup>1</sup>National research nuclear university MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

<sup>2</sup>Specialized Electronic Systems, Moscow

<sup>3</sup>JSC "CRI "Cyclone", Moscow

## **RESEARCH OF RADIATION TOLERANCE OF OLED-DIODES TO GAMMA-RAY AND NEUTRON IMPACT**

This paper presents the research of optical and electrical parameters changes of OLED-diode under gamma-irradiation and neutron impact.

Мультифункциональные электронные дисплеи заменили большое количество электромеханических индикаторов в аппаратуре космических станций. Они способны одновременно отображать состояние транспорта, перечней и процедур технического обслуживания на станции и многое другое. OLED-дисплеи на основе органических светодиодов являются перспективной заменой ЖК-дисплеев в космических программах в виду их меньших габаритов и энергопотребления при той же яркости изображения, больших углов обзора, а также возможности создания гибких дисплеев.

Как и все электронное оборудование, находящееся в космическом пространстве, дисплеи могут подвергаться воздействию космической радиации. Анализ литературных источников показал малое количество данных по тематике радиационной стойкости OLED-технологии, что

делает актуальным постановку задачи исследований данного класса на стойкость к воздействию различных типов воздействий [1, 2].

Перед исследованиями были получены люмен-амперная и спектральная характеристики, приведенные на рис. 1.

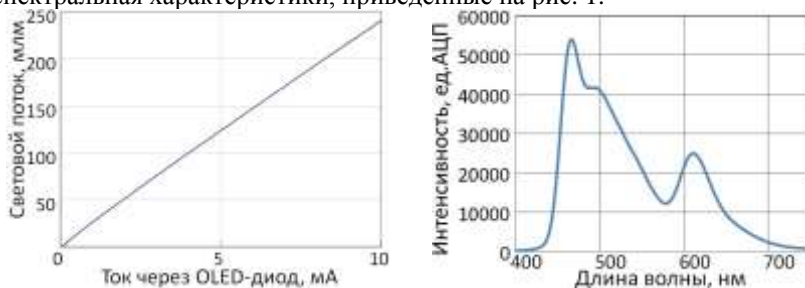


Рис. 1. Результаты контроля параметров OLED-диодов до воздействия

Для изделий на основе кремния основными типами радиационных эффектов являются образование структурных дефектов и накопление ионизационной дозы. Для исследований стойкости к образованию структурных повреждений было проведено облучение образцов OLED-диодов нейтронами, в виду малого по сравнению с другими частицами энерговыделения на ионизацию. Испытания на ионизационные эффекты будут проведены при воздействии гамма-квантов. Данное разделение воздействий позволяет определить доминирующий для OLED-диодов тип радиационных эффектов.

Контроль параметров OLED-диодов после воздействия нейтронов будет проведен после достижения образцов норм санитарной безопасности с последующим облучением гамма-квантами. Предполагается, что при облучении гамма-квантами, в виду ионизационных эффектов в дырочно-транспортном и дырочно-инжекционном слое будет снижена эффективность инжекции и переноса дырок, из-за рекомбинации с индуцированными электронами. Данный процесс снизит ток от анода к катоду и приведет к снижению оптической мощности излучения. Вероятно, данный эффект проявится непосредственно во время облучения и при отсутствии воздействия параметры возвратятся в норму.

#### *Список литературы*

1. Neighbors H., Salazar G., Steele G., Sarma K.R., Schmidt J., Wiggs J., Mejias-Rolon Y. // OLED Technology Evaluation for Space Applications, 2015.
2. Wetzelaer G.A.H. Charge Transport and Recombination in Organic-Semiconductor Diodes // Zernike Institute. PhD thesis series 2014-05.

**В.К. САХАРОВ**  
*АО «Центр ВОСПИ», Москва*

## **МНОГОМОДОВЫЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ГИРОСКОП – ПРИНЦИП РАБОТЫ**

Обсуждается механизм работы многомодового полупроводникового лазерного гироскопа (МПЛГ) с частотной подставкой.

**V.K. SAKHAROV**  
*“VOSPI Centre” Ltd, Moscow*

## **MULTIMODE SEMICONDUCTOR LASER GYRO - PRINCIPLE OF OPERATION**

The principle of operation of the multimode semiconductor laser gyro (MSLG) with dithering is proposed.

Использование синусоидальной частотной подставки, создаваемой с помощью внутрирезонаторной фазовой модуляции, позволило существенно поднять чувствительность МПЛГ [1]. Но оказалось неожиданным, что при многомодовом характере генерации биения на выходе имеют большую амплитуду, что говорит об интерференции многомодового излучения с высоким контрастом полос.

Цель настоящей работы - объяснить часть механизма работы МПЛГ, связанную с интерференцией многомодового излучения. На подход к решению поставленной задачи указывает характер выходного сигнала - большая амплитуда биений в начале каждого полупериода подставки, а затем постепенно падающая вплоть до конца полупериода, когда амплитуда быстро становится вновь большой (рис. 1).

Исходя из этого, работу многомодового МПЛГ можно объяснять следующим образом. Большая амплитуда биений обеспечивается знакопеременной подставкой, создающей условия для синхронизации биений большого числа пар встречных волн, являющихся в каждой паре модами с одинаковыми продольными индексами. Постепенное уменьшение амплитуды биений связано с накоплением фазовых флуктуаций в модах и, как следствие, с падением контраста интерференции. Быстрый подъем амплитуды биений в промежутках между полупериодами подставки вызывается захватом частот.



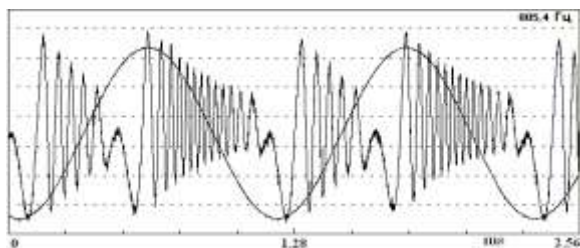


Рис. 1. Эпюры биений при вращении и сигнал фазовой модуляции

В основе математической модели многомодового МПЛГ результат интерференции для отдельной  $i$ -той моды, записываемый в следующем виде:

$$I_i(t) = I_{i0} \left\{ 1 + V_i(t) \cos \left[ \Delta\Phi(t) + \Theta_i(t) \right] \right\}, \quad (1)$$

где  $I_{i0}$  - интенсивность моды,  $V_i(t) = \left\langle \exp[(j\Delta\Psi_i(t))] \right\rangle$  - контраст интерференции,  $\Delta\Psi_i(t)$  - случайная разность фаз встречных волн, угловые скобки означают результат статистического усреднения и  $\Delta\Phi(t)$  - разность фаз, создаваемая частотной подставкой и эффектом Саньяка. Полагаем при этом, что условия для генерации всех мод равные и поэтому можно считать, что фазы  $\Theta_i(t) = \arg \left\langle \exp[(j\Delta\Psi_i(t))] \right\rangle$  и распределения флуктуаций для всех мод идентичные, а, следовательно, (1) с очевидными оговорками представляет результат интерференции суммы всех мод.

Таким образом, характер биений на выходе устройства определяется статистическим распределением фазовых флуктуаций, модель описывается уравнениями, определяющими динамику этого распределения, а источником фазовых флуктуаций является спонтанное испускание фотонов в среде усиления. Что касается быстрого возрастания контраста интерференции и амплитуды биений, то это происходит благодаря действию захвата частот, уменьшающего ширину распределения фазовых флуктуаций и рассчитываемого с помощью уравнений модели одномодового лазерного гироскопа [2].

*Список литературы.*

1. Прокофьева Л.П., Сахаров В.К., Щербаков В.В. // Квант. элект. 2014. Т.44. С.362.
2. Сахаров В.К. // Квант. элект. 2016. Т.46. С.567.

В.А. КОМОЦКИЙ, Ю.М. СОКОЛОВ, Н.В. СУЕТИН  
*Российский университет дружбы народов, Москва*

## **МОДУЛЯТОР ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ УГОЛКОВОГО ОТРАЖАТЕЛЯ И ГЛУБОКОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ**

Предложена новая конструкция модулятора лазерного излучения на основе глубокой фазовой дифракционной решетки совместно с уголкового отражателем. Проведен теоретический анализ характеристик датчика, и проведены эксперименты по измерению статических и динамических характеристик модулятора.

V.A. KOMOTSKII, Yu.M. SOKOLOV, N.V. SUETIN  
*Peoples' Friendship University of Russia, Moscow*

## **MODULATOR OF LASER RADIATION BASED ON CORNER REFLECTOR AND DEEP DIFFRACTION GRATING**

A new design of the laser modulator based on corner reflector and deep diffraction grating is proposed. A theoretical analysis of the device is carried out, and experiments on the measurements of static and dynamic characteristics of modulator are done.

Метод модуляции лазерного излучения с применением фазовой дифракционной решетки с прямоугольным профилем в виде меандра и глубиной порядка несколько длин волн оптического излучения был ранее описан в [1, 2]. В новой схеме модулятора с применением уголкового отражателя выходной оптический пучок нулевого порядка дифракции образован в результате последовательного отражения лазерного пучка от дифракционной решетки и от зеркала, плоскость которого образует угол  $90^\circ$  с плоскостью ДР. Направление выходного пучка **не изменяется** при поворотах уголкового отражателя, что является достоинством новой схемы.

Схема модулятора изображена на рис. 1. Устройство содержит блок уголкового отражателя (1), который расположен на пути пучка излучения лазера (2). На одной из плоскостей блока установлена глубокая рельефная отражающая решетка (3) с прямоугольным профилем в форме меандра. Глубина рельефа составляет несколько длин волн  $\lambda$  модулируемого излучения. На второй плоскости блока закреплено зеркало (4), которое совместно с решеткой образует уголкового отражатель, возвращающий

падающий на него пучок излучения лазера в противоположном направлении. Блок связан с осью электромеханического привода (5), который обеспечивает поворот на заданный угол. После отражения от блока излучение распадается на дифракционные порядки и затем, после отражения от вспомогательного зеркала (6), направляется на диафрагму (7), которая выделяет из дифракционной картины только нулевой порядок и направляет его на фотодетектор (9). Механический привод с блоком установлен на координатном столике (8), который обеспечивает перемещение по двум координатам и поворот привода с блоком.

Был создан экспериментальный макет модулятора в соответствии со схемой на рис. 1. По методике, изложенной в [3], определялась глубина рельефа, и проводились измерения статических и динамических характеристик датчика. На рис. 2 представлены типичные графики сигналов на резисторе нагрузки фотодетектора при разных значениях амплитуды колебаний механического привода. Проведенные эксперименты подтверждают возможность получения линейной аналоговой модуляции мощности лазерного пучка от времени в пределах глубин модуляции порядка 80%. Также возможна 100% модуляция лазерного пучка, однако в этом случае форма выходного сигнала существенно отличается от формы входного гармонического сигнала.

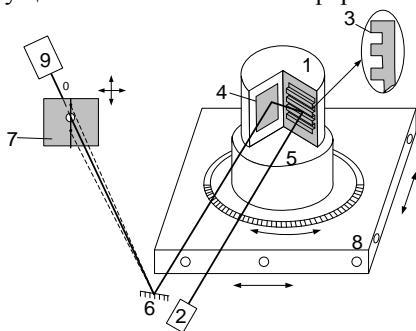


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

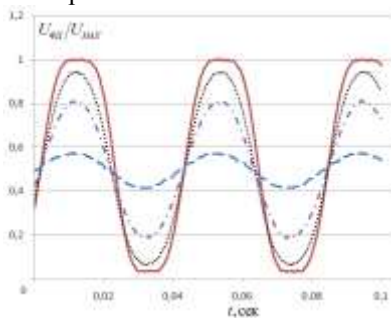


Рис. 2. Нормированные графики сигнала фотодетектора при разных амплитудах гармонических колебаний привода

#### Список литературы

1. Комоцкий В.А., Соколов Ю.М., Басистый Е.В. // РЭ. 2012. Т.57.№6. С.1.
2. Комоцкий В.А., Соколов Ю.М. // Модулятор лазерного излучения. Пат. РФ. Пер.№2411620 от 13.08.2009 г. Б.И. 2011. 4.
3. Комоцкий В.А., Соколов Ю.М., Басистый Е.В. // РЭ. 2011. Т.56. №2. С.243.

**Д.В. ШАУЛЬСКИЙ**

*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики  
им. Н.Л. Духова, Москва*

## **УЗЕЛ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ РАЗВОДКИ МНОГОКАНАЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО ГЕНЕРАТОРА**

Рассмотрены возможные способы по гомогенизации, делению и введению оптического излучения в многоканальный волоконно-оптический тракт. Представлены результаты оптимизации элементов узла с помощью компьютерного моделирования. Продемонстрированы результаты экспериментального макетирования.

**D.V. SHAULKIY**

*All-Russia Research Institute of Automatic, Moscow*

## **NODE FIBER-OPTIC WIRING MULTICHANNEL LASER GENERATOR**

The presentation considers the possible methods of homogenization, division and injection of high power optical radiation in a multi-channel fiber-optic tract. The results of the components parameters optimization by means of computer simulation are represented.

Ввод мощного многомодового лазерного излучения в многоканальную волоконно-оптическую систему доставки требует контроля ряда параметров для максимизации пропускной способности и минимизации возможности разрушения оптического волокна. Достижение максимальной мощности излучения не сопровождающееся разрушением оптического волокна возможно при гомогенизации излучения лазера, другими словами формировании равномерного профиля пучка (“tophat”) на входном торце волокна. С целью гомогенизации можно использовать диффузные рассеиватели, данный метод отличается низкой стоимостью компонент и простотой реализации, однако, также обладает негативным свойством – низкой пропускной способностью.

Более эффективный метод, позволяющий сформировать “tophat”-профиль пучка при сохранении общей компактности системы ввода излучения подразумевает использование массива микролинз или, как его еще называют, микролинзовый растр [1-3]. Данный метод обеспечивает равномерное распределение пространственной интенсивности в

предполагаемой области ввода излучения в волокно, при этом распределение в значительной степени не зависит от модового состава излучения, профиля пучка, углов его расходимости.

Сложность использования метода гомогенизации с применением микролинзового раstra, заключается в изготовлении самого раstra. Общепринятым форматом представления массива микролинз является плотная упаковка (шестиугольная апертура) плосковыпуклых линз микронного размера. Данный формат позволяет достичь наименьшего размера фокусного пятна, однако, изготовление такого изделия, является дорогостоящим, высокотехнологичным процессом, вовлекающим химическое травление и микро-полировку стекла.

Авторами данной работы было сделано предположение о возможном использовании формата плосковогнутых линз для фокусировки излучения и дальнейшего ввода в оптическое волокно диаметром 300 мкм. Первоначально, для проверки данной гипотезы было проведено математическое моделирование в среде Zemax, подтвердившие предположение. С помощью аналитического и компьютерного моделирования были рассчитаны основные параметры оптической системы, такие как фокусные расстояния и размеры апертур микролинз и большой собирающей линзы.

*Список литературы*

1. Dickey F.M., Holswade S.C. Laser Beam Shaping: Theory and Techniques. Chapter 7. Marcel Dekker, 2000.
2. Weichman L.S., Dickey F.M., Shagam R.N. Beam Shaping Element for Compact Fiber Injection Systems. // Proc. SPIE. 2000. V.3929.
3. Dickey F.M., Holswade S.C., Shealy D.L Laser Beam Shaping Applications. Chapter 1 and 3. CRC Press, Taylor and Francis, 2005.

О.Т. КАМЕНЕВ, Ю.С. ПЕТРОВ, Р.В. ХИЖНЯК,  
В.А. КОЛЧИНСКИЙ

*Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток*

## **РЕГИСТРАЦИЯ СЛАБЫХ СЕЙСМОСИГНАЛОВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИМИ ПРИЕМНИКАМИ**

Показана возможность применения волоконно-оптических интерферометрических приемников для наземной регистрации слабых сейсмосигналов, формируемых морскими судами, проходящими вблизи побережья.

O.T. KAMENEV, Yu.S. PETROV, R.V. KHIZNYAK,  
V.A. KOLCHINSKIY

*Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok*

## **DETECTION OF WEAK SEISMIC WAVES BY FIBER-OPTIC INTERFEROMETRIC SEISMOMETERS**

The possibility of detection of weak seismic waves in sea-ground interface by fiber-optic interferometric seismometer is demonstrated.

Оптическая интерферометрия является одним из наиболее чувствительных методов регистрации смещений [1]. Применение для построения интерферометра волоконно-оптической элементной базы обеспечивает возможность создания компактных высокочувствительных вертикальных сейсмоприемников и горизонтальных деформометров, которые могут быть использованы для регистрации слабых сейсмосигналов.

В работе использовались волоконно-оптические вертикальный инерциальный сейсмоприемник и горизонтальный деформометр, в которых применяется оптическая схема интерферометра Маха-Цендера и многовитковый чувствительный элемент [2, 3]. Пороговая чувствительность вертикального сейсмоприемника  $-10^{-7}$  м/с<sup>2</sup>. Пороговая чувствительность горизонтального деформометра –  $10^{-9}$  м.

Для проверки возможности регистрации слабых сейсмосигналов были проведены полевые испытания разработанных сейсмоприемников по наземной регистрации сейсмосигналов, формируемых морскими судами,

проходящими на расстоянии нескольких километров от берега. На рис. 1 представлены спектрограммы выходных сигналов вертикального (а) и горизонтального (б) волоконно-оптических сейсмоприемников. На спектрограммах видны треки, соответствующие прохождению крупнотоннажного судна (1) и малогабаритного быстроходного катера (2).

Таким образом, представленные в настоящей работе волоконно-оптические сейсмоприемники на основе интерферометра Маха-Цендера открывают перспективы для создания высокочувствительных измерительных систем, предназначенных для решения широкого круга задач, связанных с регистрацией слабых сейсмоакустических сигналов.

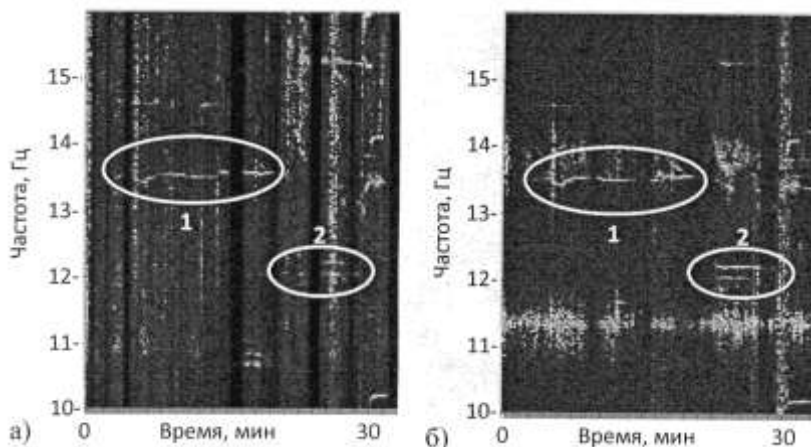


Рис. 1. Спектрограммы выходных сигналов вертикального (а) и горизонтального (б) волоконно-оптических сейсмоприемников, метка 1 – прохождение крупнотоннажного теплохода; метка 2 – прохождение быстроходного катера

Работа поддержана грантами РФФИ № 16-29-0208216 и № 16-05-00750.

*Список литературы*

1. Wagner J.W., Spicer J.B. // J. Opt. Soc. Am. B. 1987. V.4. P.1316.
2. Kamenev O.T., Kulchin Yu.N., Petrov Yu.S., Khiznyak R.V., Romashko R.V. // Sensors and Actuators A. 2016. V.244. P.133.
3. Kamenev O.T., Kulchin Yu.N., Petrov Yu.S., Khiznyak R.V. // Technical Physics Letters. 2014. V.40. №2. P.119.

Л.В. ГОРЯЧЕВ, А.А. МАРИНИН

*Саровский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Нижегородская обл.*

## **ДИФРАКЦИЯ СВЕТА И ПРОБЛЕМА АПОДИЗАЦИИ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ**

Представлены результаты исследований, посвященные экспериментальной проверке гипотезы Юнга о роли света, рассеиваемого краями дифрагирующих оптических элементов, в образовании дифракционных картин. Доказано прямое участие рассеянного света (граничной волны) в дифракционных искажениях световых пучков. Впервые показана возможность устранения модуляции интенсивности излучения по поперечному сечению лазерного луча путем устранения влияния рассеянного света. Данные экспериментальные результаты не описываются в рамках существующей теории дифракции.

L.V. GORYACHEV, A.A. MARININ

*Sarov State Physics and Technical Institute NRNU MEPhI, Nizhny Novgorod region*

## **DIFFRACTION OF LIGHT AND THE PROBLEM OF LASER BEAMS APODIZATION**

Experimental study of Young's hypothesis about the role of light scattered by the edges of optical elements in the formation of diffraction images has been delivered. Influence of scattered light (boundary wave) on the diffraction distortion of light beams has been proved. Possibility of elimination of laser radiation modulation along cross-section by avoiding scattered light has been shown for the first time. Given experimental results can't be described within the present diffraction theory.

Последние десятилетия в связи с разработкой лазеров с рекордными мощностями излучения остается актуальной задача получения равномерного распределения интенсивности излучения по поперечному сечению лазерного луча. Одной из основных причин неоднородности лазерного пучка является дифракция на краях оптических элементов.

Перепады интенсивности излучения, вызванные дифракцией, могут привести к разрушению оптических элементов мощной лазерной установки в его выходных усилительных каналах. А при фокусировке излучения они могут вызвать самопробой лазерного луча на его пути к мишени.



В связи с этим во всем мире ведутся исследования с целью разработки так называемых «мягких диафрагм» (т.н. «аподизаторов»). В рамках проведенной работы создана методика, позволяющая уже сегодня изготавливать мягкие диафрагмы, которые по своим параметрам будут достойны их применения в лазерных установках. Диафрагмы на основе зеркал, подвергнутых специальной обработке поверхности, позволили получить световые пучки без дифракционных искажений, что было предсказано теоретически авторами при учете прямого участия рассеянного света (граничной волны) в дифракционных искажениях световых пучков. Впервые экспериментально показана возможность устранения модуляции интенсивности излучения по поперечному сечению лазерного луча путем устранения влияния рассеянного света. Данные экспериментальные результаты пока не описываются в рамках существующей теории дифракции.

*Список литературы*

1. Young T. // Phil. Trans. Roy. Soc. 1802. 20. 26.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973.
3. Калашников А. // Ж. Русск. физ.-хим. об-ва. Физ. часть. 1912. 44. 133.
4. Никаноров Н.Ю., Седухин А.Г. Аподизирующий фильтр. [www.myshared.ru/slide/62108/](http://www.myshared.ru/slide/62108/), 2012.
5. Saari P., et al. // Laser Physics. 2010. V.20. No 5. P. 948-953.

Е.Н. ВОРОНЦОВ<sup>1</sup>, К.В. ЕФИМОВА<sup>1,2</sup>, С.П. КОТОВА<sup>1,2</sup>,  
Н.Н. ЛОСЕВСКИЙ<sup>1</sup>, Д.В. ПРОКОПОВА<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

<sup>2</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева

## **КОМПАКТНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ДЕМОНСТРАЦИИ СПИРАЛЬНЫХ ПУЧКОВ СВЕТА**

Создана экспериментальная установка, позволяющая наглядно продемонстрировать способность спиральных пучков света сохранять структуру распределения интенсивности и испытывать поворот при распространении в свободном пространстве.

E.N. VORONTSOV<sup>1</sup>, K.V. EFIMOVA<sup>1,2</sup>, S.P. KOTOVA<sup>1,2</sup>,  
N.N. LOSEVSKY<sup>1</sup>, D.V. PROKOPOVA<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Samara Branch of the Lebedev Physical Institute

<sup>2</sup>Samara National Research University

## **COMPACT UNIT FOR DEMONSTRATION OF SPIRAL LIGHT BEAMS**

An experimental setup is developed for the demonstration of spiral light beams. It allows visually see the twist of the beam intensity distribution whilst propagating.

Спиральные пучки света это необычное оптическое явление. Пространственная структура пучков в поперечном сечении не изменяется при распространении с точностью до масштаба и поворота. Такие световые поля были найдены и впервые описаны сотрудниками Самарского филиала ФИАН Е.Г. Абрамочкиным и В.Г. Волостниковым [1]. Спиральные пучки обладают орбитальным угловым моментом, характеризуются разнообразием форм, в частности, могут быть в виде произвольной кривой. На рис. 1 приведено в качестве примера изображение спирального пучка в форме треугольника в поперечном сечении на различных расстояниях вдоль оси распространения.

Спиральные пучки света активно изучаются и интересны для ряда прикладных задач (расширение функциональных возможностей лазерных пинцетов, увеличение разрешения флуоресцентных оптических микроскопов в продольном направлении, и т.д.). Представляет интерес, в том числе для образовательных учреждений, создание компактной установки для демонстрации спиральных пучков света и их удивительных свойств.

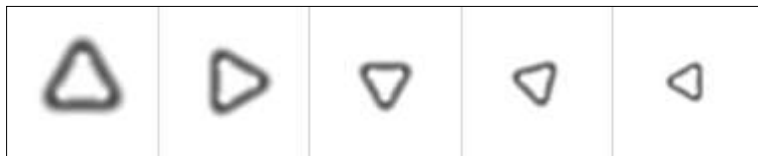


Рис. 1. Распределения интенсивности спирального пучка в виде треугольника на различных расстояниях вдоль оси распространения

В работе проведен расчет параметров установки, позволяющей получить хорошие для визуального восприятия четкость и разрешение изображения. Выполнен сравнительный анализ формирования пучков двумя методами: с помощью амплитудно-фазовых масок и голографическим способом [2]. Проведены эксперименты по физическому моделированию демонстрационной установки по формированию спиральных пучков с использованием жидкокристаллического пространственного модулятора света HOLOEYE НЕО-1080.

На основе результатов проведенных расчетов и экспериментов создана компактная установка для демонстрации спиральных пучков. В качестве формирующих фазовых элементов в ней используются маски на основе бихромированной желатины.

Отметим, что свойство вращения распределения интенсивности может быть использовано в защитной голографии. Выполнены оценки параметров голограмм для этого случая. Работа выполнена при поддержке УНК ФИАН.

*Список литературы*

1. Abramochkin E.G., Volostnikov V.G. // PHSY-USP. 2004. V.47(12). P.1177.
2. Афанасьев К.Н., Кишкин С.А. // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т.14. С.184.

**В.Г. ВОЛКОВ**

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

## **ПСЕВДОБИНОКУЛЯРНЫЕ ОЧКИ НОЧНОГО ВИДЕНИЯ ДЛЯ РАБОТЫ В ОБЛАСТИ СПЕКТРА 0,9–1,7 мкм**

Представлен метод построения псевдобинокулярных очков ночного видения (ОНВ), содержащих SWIR преобразователь изображения и работающих в области спектра 0,9–1,7 мкм. По сравнению с традиционной областью спектра 0,4–0,9 мкм здесь появляется возможность работы при пониженной прозрачности атмосферы, в области более высоких уровней естественной ночной освещенности и природных контрастов цели с фоном. Приведены основные параметры прибора.

**V.G. VOLCOV**

*Bauman Moscow State Technical University*

## **PSEUDONOCARDIA NIGHT VISION GOGGLES FOR OPERATION IN THE SPECTRAL RANGE OF 0.9 TO 1.7 $\mu\text{m}$**

Presents a method of constructing pseudobinary night vision goggles (NVG), containing the SWIR image Converter and working in the spectral range of 0.9 to 1.7 microns. Compared with the traditional range of 0.4–0.9  $\mu\text{m}$  here appears to operate at reduced transparency of the atmosphere, in the field of higher levels of natural night illumination and natural contrasts target to background. The basic parameters of the device are showed.

Серийные очки ночного видения (ОНВ) на основе электронно-оптических преобразователей (ЭОП) работают в области спектра 0,4–0,9 мкм. Средняя величина естественной ночной освещенности (ЕНО) в безлунную ночь в этой области спектра достигает  $(1,5-3)\times 10^{-9}$  Вт/см<sup>2</sup> мкм, а в области 1,4–1,7 мкм –  $(1,5-2)\times 10^{-7}$  Вт/см<sup>2</sup> мкм, т.е. на 2 порядка выше. При этом пропускание толщи атмосферы 1 км для 0,6 мкм составляет 0,72, а в центре области 1,4–1,7 мкм – 0,93. Яркость атмосферной дымки снижается больше чем на порядок в области спектра 1,4–1,7 мкм по сравнению с областью 0,4–0,9 мкм. Контраст объекта наблюдения с фоном в области 1,4–1,7 мкм более стабилен и выше в 1,4–1,5 раза, чем в области спектра 0,4–0,9 мкм [1]. В области спектра 1,4–1,7 мкм можно работать при пониженной прозрачности атмосферы (дымка, туман, дождь, снегопад и др.), в некоторых дымах и в пыли, а также визуализировать

излучение современных лазерных дальномеров с длинами волны 1,55 мкм и 1,7 мкм.

В связи с этим предлагаются псевдобинокулярные ОНВ на основе преобразователя ИК изображения в видимое- Shot Wave Infra Red (SWIR) (рис. 1). Он содержит матрицу фотодетекторов на основе InGaAs (рабочая область спектра 0,9–1,7 мкм 320x256 пикселей, шаг пикселей 30 мкм,  $D^* = 10^{13} \text{ Вт}^{-1} \text{ см Гц}^{0,5}$ ), электронный блок обработки изображения и OLED дисплей. На матрицу сфокусирован объектив с фокусным расстоянием 20 мм и относительным отверстием 1:1,4, на OLED дисплей с числом пикселей 800x600 – окулярная система с увеличением  $1^x$ , угол поля зрения  $27^\circ \times 21^\circ 42'$ , дальность распознавания ростовой фигуры человека при ЕНО =  $3 \times 10^{-3}$  лк – 200 м, массу 450 г, напряжение питания 2,5–3,3 в (2 батареи АА типа).



Рис. 1. Внешний вид ОНВ с рабочей областью спектра 0,9–1,7 мкм

На рис. 2 показан характер наблюдаемого в ОНВ изображения (в центре) по сравнению с изображением в ОНВ для области спектра 0,4–0,9 мкм (слева) и в тепловизионные ОНВ для области спектра 8–12 мкм (справа). Преимущество изображения в ОНВ на базе SWIR очевидно.



Рис. 2. Изображение, наблюдаемое в ОНВ различного типа

*Список литературы*

1. Гейхман И.Л., Волков В.Г. Видение и безопасность. М.: Новости. 2009.

С.А. КОВАЛЕНКО

*Белорусский государственный университет, Минск*

## **СПЕКТРОМЕТРИЯ ВИДИМОГО ДИАПАЗОНА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИЗМЕРЕНИЙ IN SITU**

В связи со значительным технологическим прогрессом в области полупроводниковой электроники и приборостроения наблюдается тенденция к миниатюризации оборудования, которая в сочетании с беспроводным способом передачи данных позволяет значительно расширить сферу применения приборов *in situ*. Данная работа посвящена созданию спектрометра. Разработанный спектрометр полностью портативен, обладает малыми объемными характеристиками и позволяет производить спектральные измерения в видимом диапазоне с разрешением в 2 нм. Визуализация данных обеспечивается как по средствам ПК, так и мобильного устройства с ОС Android.

S.A. KAVALENKA

*Belarusian State University, Minsk*

## **VISIBLE RANGE SPECTROSCOPY FOR IN SITU RESEARCH AREA**

There is the trend toward miniaturization of equipment due to the significant technological advances in the field of semiconductor electronics. The trend in combination with wireless data transfer method can significantly extend the scope of the instrument during its application in situ. Spectrometer was designed completely portable. It has small volume characteristics and enables measurement in the visible spectral range with a resolution of 2 nm. Data visualization is provided both by means of a PC or a mobile device with Android OS.

Актуальным направлением современного оптического приборостроения является разработка и создание портативного малогабаритного спектрометрического оборудования. Методы спектрального анализа нашли широкое применение во многих отраслях науки при работе как с техническими материалами, так и со сложными биологическими объектами. Создание портативного оборудования позволит расширить область применения и упростить работу при проведении исследований вне лабораторных условий. В настоящее время созданы малогабаритные спектрометры с размерами вплоть до одного сантиметра [1]. Однако их спектральное разрешение (порядка 10 нм) для многих задач является недостаточным. Существуют спектрометры с

небольшими объемными параметрами [2], но портативными их назвать нельзя, поскольку питание спектрометра и передача данных обеспечивается проводным способом, чаще всего через USB-шину.

Разработанный спектрометр видимого диапазона (400-720 нм) имеет линейную дисперсию 17 нм/мм. Его дисперсионным элементом является пленочная лавсановая дифракционная решетка с синусоидальным профилем, на которую напылен слой алюминия (20 нм), сцепленная со стеклянной подложкой в эксикаторе PEG-содержащим клеем. Объемные параметры спектрометра составляют 110 x 68 x 50 мм, и могут быть еще уменьшены детальным подбором корпуса. Внешний вид спектрометра показан на рис. 1а. Компактность оптического модуля прибора достигается установкой дифракционной решетки в автоколлимационном режиме для  $\lambda = 551$  нм, что соответствует примерно середине рабочего диапазона. Регистрирующим элементом является ПЗМ-линейка TSD-1304. Передача спектральных данных, которые собраны в массив состоящий из значений интенсивности и номера пикселя, данных обеспечивается Bluetooth модулем HC-05. Беспроводная передача спектра может быть так же осуществлена Wi-fi модулем с большей скоростью, однако поскольку одной из задач было сделать портативный спектрометр, питание спектрометра обеспечивается аккумулятором, расход заряда которого, при использовании Wi-fi, в разы повышается. Максимальная скорость передачи данных без потерь в разработанном спектрометре – 921600 бит/сек, что соответствует, с учетом задержек на формирование спектра и визуализацию, двум спектрам/с. Примеры полученных спектров, визуализированных на смартфоне с помощью специально написанного приложения, изображены на рис. 1б и 1в.

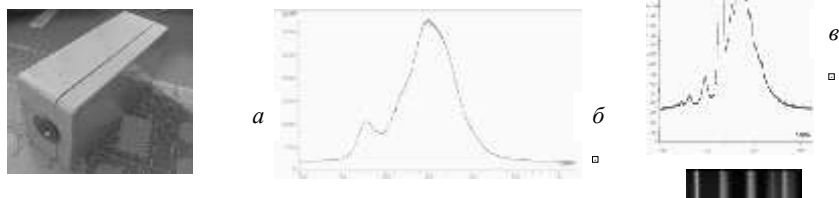


Рис. 1. Общий вид спектрометра (а); спектры излучения осветительных приборов (б, в)

#### Список литературы

1. <http://www.hamamatsu.com/eu/en/product/category/5001/4016/index.html>.
2. <http://oceanoptics.com/product-tag/flame/>.

А.Е. РАЗУВАЕВ, О.В. ШВЕДОВА, В.Ю. ТУГАЕНКО  
*Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королева, Королев*

## **ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИЕМНИК-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ**

В работе представлены основные принципы построения фотоэлектрического приемника-преобразователя лазерного излучения, предназначенного для высокоэффективного преобразования в электричество неравномерных лазерных пучков высоких плотностей в системе беспроводной передачи электроэнергии.

A.E. RAZUVAEV, O.V. SHVEDOVA, V.Yu. TUGAENKO  
*S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Korolev*

## **HIGH-PERFORMANCE PHOTOVOLTAIC RECEIVER OF LASER RADIATION FOR WIRELESS POWER TRANSFER**

In this paper we describe base principles of construction of photovoltaic receiver of laser radiation for high-performance converting to electrical power the energy of laser beam, which has non-uniform distribution and high density of energy

Приемник-преобразователь на основе фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) в системе беспроводной передачи энергии лазерным излучением [1] должен эффективно работать с неравномерным лазерным излучением плотностями от 5-10Вт/см<sup>2</sup> и выше, и иметь рабочее выходное напряжение не менее 4В- это необходимо для эффективной работы mppt- преобразователей напряжения [2].

Используемые в приемнике-преобразователе InGaAs и AlGaAs ФЭП обладают высокой эффективностью, на данный момент до 60% [3], но являются однокаскадными и имеют низкое выходной напряжение (не более 0.7-1В). Используемые в солнечных батареях последовательно-параллельные схемы коммутации ФЭП имеют большие энергетические потери(30-50%) при засветке неравномерным лазерным пучком.

В данной работе представлена матричная параллельно-последовательная схема коммутации ФЭП (рис. 1) в приемнике-преобразователе, которая позволяет снизить энергетические потери до величин не более 5-10%. Принцип построения компоновочной и коммутационной схемы приемника-преобразователя представлен на рис. 1. Необходимое напряжение обеспечивается последовательным



соединением параллельных групп ФЭП (пронумерованы 1..8). ФЭП из каждой параллельной группы равномерно распределены по площади приемника-преобразователя, что обеспечивает максимально одинаковую засветку всех параллельных групп, и минимизирует токовые потери из-за различной засветки элементов в последовательной цепочке. Разработана математическая модель электрической и компоновочной схемы приемника-преобразователя, позволяющая оптимизировать параметры конструкции: количество, расположение и коммутацию ФЭП в приемнике-преобразователе. Проработана конструкция приемника-преобразователя, включающая в себя систему воздушного охлаждения для работы на высоких плотностях излучения, и сеть датчиков, интегрированную в конструкцию приемника-преобразователя для системы обратной связи, обеспечивающей точное наведение лазерного пучка на приемник.

Для экспериментального подтверждения эффективности матричной схемы создан макет приемника-преобразователя на основе 220 кремниевых ФЭП с креплением на печатную плату (рис. 2). Потери на коммутацию в макете составили ~7% при засветке гауссовым пучком лазерного излучения размером в 0.5 размера приемника-преобразователя.

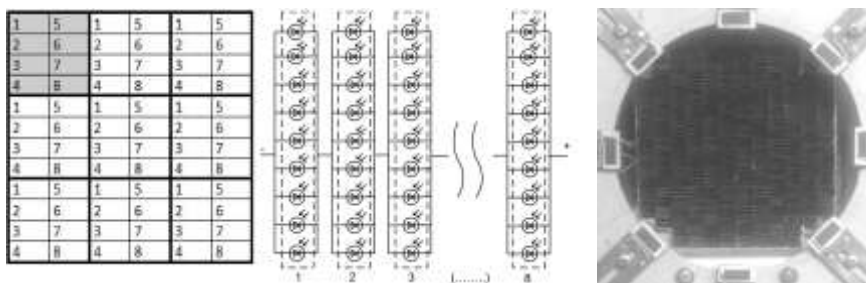


Рис. 1. Принципиальная схема матричного приемника-преобразователя, слева- компоновочная схема, справа- коммутационная схема

Рис. 2. Макет приемника-преобразователя

#### Список литературы

1. Chertok B.E., et al. Remote Electric Power Transfer Between Spacecrafts by Infrared Beamed Energy // AIP Conference Proceedings. 2011. V.1402. No 1. P.489-496.
2. Salas V., Ollras E., Barrado A., Larzaro A. Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems. // Solar Energy Materials & Solar Cells. 2006. 90.
3. Andreev V., Khvostikov V., Kalinovsky V., Lantratov V., Grilikhes V., Rummyantsev V., Shvarts M., Fokanov V., Pavlov A. (56%) High current density GaAs and GaSb photovoltaic cells for laser power beaming. 2003.

**В.Г. ВОЛКОВ**

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

## **ПОДВОДНЫЙ ТЕЛЕВИЗИОННЫЙ МОНОКУЛЯР С ДИСТАНЦИОННОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ ИЗОБРАЖЕНИЯ**

Рассматривается подводный телевизионный (ТВ) монокуляр, выполненный на основе ТВ камеры на базе EMCCD матрицы ПЗС. Изображение дистанционно передается из глубины на сушу с помощью волоконно-оптического кабеля. Приведены основные параметры ТВ монокуляра.

**V.G. VOLCOV**

*Bauman Moscow State Technical University*

## **UNDERWATER TELEVISION MONOCULAR WITH REMOTE TRANSMISSION IMAGE**

Seen underwater television (TV) monocular, is made on the basis of the TV camera on the basis of the EMCCD CCD. The image is transmitted remotely from the depths to land with a fiber optic cable. The basic TV settings monocular.

В настоящее время актуальной проблемой является создание портативных подводных приборов ночного видения, допускающих их установку на водолазном шлеме и обеспечивающих наблюдение под водой на глубине до 60 м. Широко известны подводные ночные монокуляры, состоящие из объектива, электронно-оптического преобразователя и окуляра [1]. Однако их недостатком является невозможность дистанционной передачи изображения из глубины на сушу. Поэтому предлагается ТВ монокуляр без этих недостатков (см. блок-схему на рис. 1). На входе монокуляра установлен фильтр 1, пропускающий излучение в области 0,51 – 0,55 мкм – наиболее эффективной с точки зрения прохождения излучения под водой. Объектив 2 создает изображение объекта наблюдения на матрице ПЗС ТВ камеры 3. Матрица ПЗС EMCCD, обеспечивает чувствительность до  $10^{-5}$  лк [2]. Видеосигнал с выхода ТВ камеры 3 со встроенным видеоусилителем передается в 1-й ТВ монитор 4 на основе OLED дисплея. На него сфокусирован 1-й компонент 5 оптики переноса изображения 6. Компонент 5 через защитное стекло 7 водолазного шлема и 1-е плоское зеркало 8 сопряжен со 2-м компонентом 9 оптики переноса 6. Компонент 9 с помощью 2-го плоского зеркала 10 оптически сопряжен с окуляром 11.

Изображение с экрана 1-го ТВ монитора 4 передается в переднюю фокальную плоскость окуляра, через который наблюдает водолаз. Так как защитное стекло 7 водолаза находится в параллельном пучке, то обеспечивается простая юстировка наружной части монокуляра с его частью внутри водолазного шлема. Второй выход ТВ камеры 3 через модулятор 12 подключен ко входу волоконно-оптического кабеля 13. Модулятор 12 преобразует видеосигнал со 2-го выхода ТВ камеры 3 в оптический модулированный сигнал, который по кабелю 13 передается в демодулятор 14. Он преобразует оптический сигнал в видеосигнал, поступающий во 2-й ТВ монитор 15 для работы наземного оператора. Масса монокуляра (позиции 1 – 11) не превышает 0,5 кг, а масса наземной части прибора (позиции 14, 15) - 5 кг при энергопотреблении не более 45 Вт. Питание подводной части прибора обеспечивается от = 9В, а наземной части – от сети ~ 220 В 50 Гц. Для работы под водой в полной темноте ТВ монокуляр может быть укомплектован светодиодным осветителем с длиной волны 0,51 мкм, мощностью излучения 0,25 Вт, с углом подсвета 7°, массой 0,2 кг и энергопотреблением не более 1 Вт при питании от = 9 В. Угол поля зрения монокуляра составляет 10°, увеличение - 1 крат.

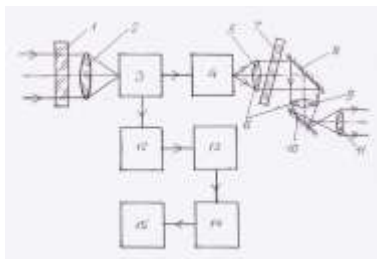


Рис. 1. Блок-схема подводного ТВ монокуляра



Рис. 2. ТВ монокуляр в рабочем положении на шлеме водолаза.

#### Список литературы

1. Гейхман И.Л., Волков В.Г. Видение и безопасность. М.: Новости. 2009.
2. Волков В.Г. Высокочувствительные телевизионные камеры для систем безопасности. // Системы управления, безопасности и связи. 2016. №3. С.43–95.

**В.М. ЕМЕЛЬЯНОВ, В.В ЛЕНТОВСКИЙ, Д.Л. ФЕДОРОВ**  
*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»  
им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург*

## **ПАССИВНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ**

В сообщении описан метод измерения дальности и создания пассивного дальнометра, базирующийся на использовании современной элементной базы.

**V.M. EMELIANOV, V.V. LENTOVSKII, D.L. FEDOROV**  
*Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov,  
Saint-Petersburg*

## **PASSIVE METHOD OF MEASUREMENT RANGE**

The report describes a method for the measurement range and the creation of passive ranging, based on the use of modern element base.

В настоящее время крайне актуальным становится вопрос о точных определениях координат наземных объектов, измеренных при помощи аппаратуры, размещенной на борту беспилотных летательных аппаратов. При этом задача скрытности наблюдения, как правило, является одной из важнейших, что приводит к необходимости поиска новых или модификации известных методов пассивного определения координат объектов, в частности, дальности до цели.

Появление малогабаритных чувствительных элементов с большой разрешающей способностью, в частности, современных ПЗС-матриц, позволил использовать известные методы для качественно нового подхода к пассивной дальнометрии, а именно к разработке устройств автоматического измерения расстояния до цели без участия человека.

К настоящему моменту известны различные модели оптических телевизионных дальномеров на основе аналоговой техники, а также дальномеры, использующие ПЗС-матрицы [1-3].

Общим недостатком всех этих систем является невозможность одновременного получения в конкретном устройстве большого диапазона измерения дальностей и высокой точности при заданной базе прибора и характеристиках кадрового фоторегистратора, например, ПЗС-матрицы

Предлагается обсудить метод, который с точки зрения авторов, компенсирует недостатки описанных выше подходов.

По этой методике наблюдение за целью осуществляется с концов базы дальномера, как и в рассмотренных выше системах, но несколько иным образом: наблюдение с одного из плеч (в дальнейшем – «плеча прямой наводки») осуществляется напрямую, при этом ось визирования перпендикулярна базе. При расстояниях много больших базы подобное изменение схемы не играет никакой роли, однако, в то же время позволяет получать в плече прямой наводки изображение объекта наведения в одной точке, вне зависимости от дальности до него. Величина измеряемого параллактического угла, а следовательно и расстояния до цели теперь полностью определяется информацией, полученной из второго плеча. Подобную схему измерителя можно осуществить сводя световой поток от цели с двух концов базы прибора в один фотообъектив, вблизи фокуса которого расположен кадровый фоторегистратор, например, ПЗС-матрица. Метод измерения дальности в подобной системе состоит из двух этапов. На первом этапе осуществляется наводка объектива на наибольшую резкость изображения, формируемого в области прямой наводки. При этом происходит грубое определение дальности до предмета с малой точностью. На втором этапе изображение, полученное в области прямой наводки, берется за эталон и ищется максимально соответствующее ему в области сканирования. Параллактический угол пропорционален координате центра распознанного изображения. Точный поиск цели осуществляется путем обработки и сравнения изображений на ЭВМ и производится только в диапазоне дистанций, в которых цель может быть найдена, предварительно определенном при фокусировке. При этом на обоих этапах для получения изображения предмета наводки может использоваться как его собственное излучение, так и рассеиваемый предметом свет от внешнего источника подсвета – небесного светила, прожектора или лазера.

Результирующая точность измерений определяется характеристиками объектива (в первую очередь, его угловым полем) и разрешением кадрового фоторегистратора (ПЗС-матрицы). В режиме слежения за целью изменение фокусировки не осуществляется до тех пор, пока цель действительно не может покинуть область резкого изображения. В этом режиме осуществляется только электронное сканирование без использования каких-либо подвижных механизмов.

*Список литературы:*

1. Патенты RU 2010156 C1, RU 2101056, RU 2105994 C1, RU 2096809 C1, RU 2086918 C1.
2. Пархоменко В.А. и др. Дальномер. Заявка РФ №2004131117.
3. Медведев А.В. и др. Оптический дальномер. Патент RU 2117973 C1.

В.Г. ВОЛОСТНИКОВ<sup>1</sup>, С.А. КИШКИН<sup>2</sup>, С.П. КОТОВА<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН*

<sup>2</sup>*Краснодарское высшее военное училище им. генерала армии С.М. Штеменко*

<sup>3</sup>*Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева*

## **КОГЕРЕНТНАЯ ОПТИКА КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РАСПОЗНАВАНИЯ КОНТУРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Описано решение задачи распознавания контурных изображений с использованием спиральных пучков света. Приведены краткий обзор предлагаемой методики и ссылки на развернутое исследование авторов.

V.G. VOLOSTNIKOV<sup>1</sup>, S.A. KISHKIN<sup>2</sup>, S.P. KOTOVA<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Samara Branch of the Lebedev Physical Institute*

<sup>2</sup>*Krasnodar Higher Military School*

<sup>3</sup>*Samara National Research University*

## **COHERENT OPTICS FOR RECOGNITION OF CONTOUR IMAGES**

The course of the spiral beams-assisted solution of the contour recognition problem is described. A short review of the proposed technique and references to the authors' detailed research are offered.

Распознавание изображений относится к задаче «машинного» зрения. В её рамках существует множество подходов по распознаванию, часть из которых может быть отнесена к области контурного анализа. Для выделения контуров границ объектов на изображении предлагается использовать существующие методы, такие как фильтры Собеля и детектор Кэнни. При распознавании контуров традиционно приходится сталкиваться с четырьмя классическими трудностями [1]: распознаваемый контур может отличаться от известного эталона из базы данных совокупностью таких параметров, как масштаб, поворот, выбор начальной точки, шумовые дефекты.

В [2] последовательно излагается теория спиральных пучков – световых полей, являющихся решениями волнового уравнения Леонтовича-Фока в параксиальном приближении. У них имеется ряд значимых особенностей: во-первых, они являются структурно-устойчивыми (при распространении в пространстве их распределение

интенсивности сохраняется с точностью до масштаба и поворота), вторых, существует условие (квантования), при котором их структура не зависит от выбора начальной точки. В-третьих, спиральные пучки являются гауссовыми, свертка с гауссовой экспонентой внутри которых позволяет снизить влияние шумовых факторов.

$$S(z, \bar{z} | \zeta(t)) = \exp\left\{\frac{-z\bar{z}}{\rho^2}\right\} \int_0^t \exp\left\{-\frac{\zeta(t)\zeta(\tau)}{\rho^2} + \frac{2z\zeta(\tau)}{\rho^2} + \frac{1}{\rho^2} \int_0^\tau [\zeta(\tau)\zeta'(\tau) - \zeta(\tau)\zeta'(\tau)] d\tau\right\} |\zeta'(\tau)| d\tau.$$

Выражение комплексной амплитуды спирального пучка позволяет перенести задачу распознавания из пространства контуров в пространство спиральных пучков, обладающее рядом упомянутых свойств.

Цель работы заключается в нахождении признаков контура, которые позволили бы с требуемой степенью точности идентифицировать объекты-эталон из базы знаний. Такие признаки были найдены в [3] – наборы комплексных коэффициентов разложения спирального пучка по базису ортогональной системы мод Лагерра-Гаусса. Сравнение двух контуров можно осуществлять посредством описанной в [4] функции перекрытия:

$$\Pi(\theta) = \frac{\sum_n c_n^{(1)} \overline{c_n^{(2)}} e^{-i\theta n}}{\sum_n |c_n^{(1)}|^2 \cdot \sum_n |c_n^{(2)}|^2}.$$



Рис. 1. Контур, интенсивность и фаза спирального пучка

#### Список литературы

1. Фурман Я.А. Введение в контурный анализ. М.: Физматлит, 2003.
2. Волостников В.Г. Современная оптика гауссовых пучков. М.: Физматлит, 2010.
3. Волостников В.Г. и др. // Квантовая электроника. 2013. Т.43 (7). С.646-650.
4. Волостников В.Г. и др. // Компьютерная оптика. 2014. Т.38 (3). С.476-481.

О.А. БЫШЕВСКИЙ-КОНОПКО, В.В. ПРОКЛОВ,  
А.В. ЛУГОВСКОЙ, Е.М. КОРАБЛЕВ  
*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН*

## **ПРОГРАММНЫЙ АЛГОРИТМ ЛИНЕЙНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ В ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОПОЛОСНЫХ АКУСТООПТИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ**

Предложена схема гиперспектральной обработки оптических сигналов при помощи двух многополосных АО фильтров (МАОФ) с фиксированными профилями пропускания, позволяющая при помощи одного измерения надежно распознать два объекта, находящихся в одном наземном пикселе, путем программного поиска из счетного числа объектов библиотеки спектральных образов. Проведено компьютерное моделирование предложенного алгоритма.

О.А. BYSHEVSKI-KONOPKO, V.V. PROKLOV,  
A.V. LUGOVSKOI, E.M. KORABLEV  
*Fryazino branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS*

## **THE SOFTWARE ALGORITHM OF LINEAR SPECTRAL UNMIXING IN HYPERSPECTRAL IMAGING USING MULTIBAND ACOUSTO-OPTIC FILTERS**

The scheme of hyperspectral processing of optical signals using two multiband AO filters (MAOF) with fixed transmission profiles was offered. It allows, using only one measurement, to recognize reliably the two objects, that are in the same ground pixel, by a software search from a countable number of object's spectral signatures from the library. A computer simulation of the proposed algorithm was carried out.

В данной работе рассматривается случай линейной смеси спектров отраженного излучения [1]. Заметим, что описанный ниже алгоритм является развитием идей авторов, впервые предложенных в работе [2].

Предлагаемая схема включает в себя два МАОФ, на которые поступает исследуемое излучение ( $I(\lambda) = k_1 \cdot R_1(\lambda) + k_2 \cdot R_2(\lambda)$ , где  $k_1$ ,  $k_2$  - доли пикселя, занимаемые объектами, а  $R_1(\lambda)$ ,  $R_2(\lambda)$  - их профили из библиотеки [3]) после его разделения на две равные по мощности



части. Выходы  $I_1$  и  $I_2$  с фотодетекторов  $PD_1$  и  $PD_2$  являются исходными величинами для последующего компьютерного анализа.

Результат измерений может быть представлен в виде:

$$I_1 = k_1 \cdot RF_{11} + k_2 \cdot RF_{21}, \quad I_2 = k_1 \cdot RF_{12} + k_2 \cdot RF_{22}, \quad (1)$$

где  $RF_{ij}$  - интегральные коэффициенты, равные выходной энергии сигнала с эталонным образцом  $R_j$ , прошедшим МАОФ с нормированным спектром пропускания  $F_j$  ( $i, j = 1, 2$ ). Если все  $RF_{ij}$  в (1) будут соответствовать реально находящимся в пикселе двум объектам, ее решение даст истинные  $k_1$  и  $k_2$ . Критерием этого являются условия [1]:

$$k_1 + k_2 = 1, \quad k_1, k_2 \geq 0. \quad (2)$$

Программный алгоритм линейного спектрального разделения выглядит следующим образом: система (1) решается для всех вариантов сочетаний пар объектов из имеющегося множества (для каждой пары заранее рассчитываются соответствующие  $RF_{ij}$ ) и та пара, для которой решение будет удовлетворять условиям (2), будет правильным решением.

Было проведено компьютерное моделирование для МАОФ на основе  $TeO_2$ . В качестве тестовых были выбраны 13 объектов из библиотеки [3] (8 спектральных выборок из диапазона 0.3-2.6 мкм были перенесены в диапазон  $0.87 \div 0.97$  мкм для их соответствия параметрам МАОФ) (рис. 1). В результате моделирования было показано, что предложенный алгоритм уверенно определяет оба объекта, находящихся в пикселе, при условии, что доля одного из них превышает величину  $4 \div 5$  %.

Работа поддержана грантами РФФИ 14-07-00163-А и 16-02-00124-А.

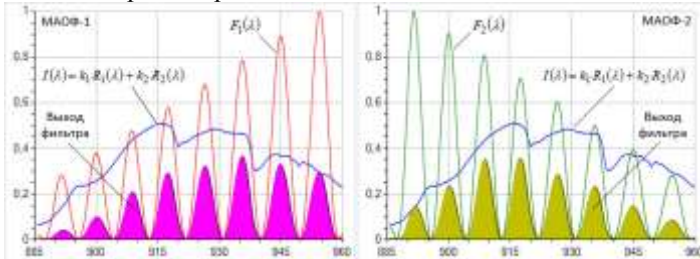


Рис. 1. Пример расчета  $I_1$  и  $I_2$  в программе компьютерного моделирования

#### Список литературы

1. Keshava N. // Lincoln Laboratory Journal. 2003. V.14. N1. P.55-78.
2. Proklov V.V., et al. // Acta Physica Polonica A. 2015. V.127. P.29-35.
3. USGS Digital Spectral Library 06 // <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06/>.

И.М. ГУЛИС, А.Г. КУПРЕЕВ  
*Белорусский государственный университет, Минск*

## **МОНОХРОМАТОРЫ ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДИСПЕРСИОННОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ**

Рассматриваются методы мультиспектральной регистрации на основе дисперсионной телескопической системы и системы с вычитанием дисперсии.

I.M. GULIS, A.G. KUPREYEU  
*Belarusian State University, Minsk*

## **IMAGE MONOCHROMATORS BASED ON DISPERSIVE SPECTRAL FILTERING**

Methods of multispectral registration based on dispersive telescopic system and spectroscopic system with dispersion subtraction are considered.

Для ряда приложений мультиспектрального анализа необходимо единовременное получение изображения с высоким пространственным разрешением при умеренном спектральном. Основные современные подходы к такой спектральной фильтрации, основанные, как правило, на использовании перестраиваемых фильтров различных типов, имеют ряд ограничений. Дисперсионная спектральная фильтрация обладает такими преимуществами, как высокое спектральное разрешение и эффективное подавление фоновой засветки на длинах волн за пределами выделяемой полосы, с учетом чего разработано два метода спектральной фильтрации.

Первый метод основан на использовании телескопической системы объективов со щелевой входной и выходной апертурой для формирования на последней углового распределения световых пучков, аналогичного распределению на входной апертуре, при этом спектральная селекция осуществляется диспергирующим элементом, размещенным вблизи плоскости промежуточного изображения [1]. Дополнительный объектив, расположенный после выходной апертуры, формирует изображение наблюдаемой области на детекторе, перестройка спектральной полосы осуществляется поворотом диспергирующего элемента. Ширина выделяемого спектрального интервала определяется дисперсией системы и шириной входной и выходной апертур, пространственное разрешение – характеристиками изображающего объектива и абберациями диспергирующего элемента. Моделирование в программе оптического

дизайна показало, что в системе с объективами «Юпитер-37А» и отражательной дифракционной решеткой 600 штр./мм в -1 порядке дифракции при ширине щелей монохроматора 1 мм ширина выделяемой спектральной полосы составляет 10 нм. Сконструирован функциональный макет монохроматора изображения видимого диапазона.

Второй метод основан на вычитании дисперсии, которое устраняет спектральное размытие выделенного маской фрагмента промежуточного пространственно-спектрального изображения объекта, причем вычитание дисперсии реализовано при обратном прохождении через ту же оптическую систему [2]. Ширина пропускаемой спектральной полосы при использовании дифракционной решетки определяется шириной отверстия в маске, шириной входного и выходного окна и дисперсионными характеристиками системы, пространственное разрешение определяется ее изображающими характеристиками. Разработано схемное решение монохроматора изображения с вычитанием дисперсии, в котором перестройка спектральной полосы пропускания осуществляется поворотом единственного диспергирующего элемента, а уменьшение aberrаций достигается близким к осевому прохождением световых пучков через сферические зеркальные объективы. Численное моделирование показало, что при фокусном расстоянии объективов 333,5 мм, эффективной числовой апертуре 0,09, дифракционной решетке 1200 штр./мм и ширине отверстия в маске 1 мм выделяемый спектральный интервал составляет 2,4 нм (теоретически рассчитанное значение 2,5 нм), типичные значения полуширины кружков рассеяния не превышают 10 мкм. Важными достоинствами предложенного метода являются относительно большая числовая апертура, возможность использования простых оптических элементов – плоских и сферических зеркал, плоской отражающей дифракционной решетки. Взаимная независимость спектрального и пространственного разрешений является существенным преимуществом обоих предложенных методов, отличающим их от распространенных методов дисперсионной спектральной фильтрации со сканированием входной щели, поскольку позволяет гибко выбирать параметры регистрации куба данных.

#### *Список литературы*

1. Воропай Е.С., Гулис И.М., Костокевич А.Г., Купреев А.Г. Дисперсионный монохроматор изображения для мультizonальной съемки // «Приборостроение-2012»: материалы конфер. Минск: БНТУ, 2012. С.46-48.
2. Гулис И.М., Купреев А.Г. Малоaberrационный монохроматор изображения с вычитанием дисперсии на основе осесимметричной схемы // Журнал прикладной спектроскопии. 2015. Т.82. №1. С.135-140.

Л.А. МАКСИМОВА<sup>1</sup>, П.В. РЯБУХО<sup>1,2</sup>, Н.Ю. МЫСИНА<sup>1</sup>,  
В.П. РЯБУХО<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов*  
<sup>2</sup>*Саратовский национальный исследовательский государственный университет*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ СУБПИКСЕЛЬНЫХ МИКРОСМЕЩЕНИЙ СПЕКЛ-СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ФАЗОВОГО АНАЛИЗА ИХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СПЕКТРОВ**

Рассматривается метод определения субпиксельных смещений спекл-структуры, формируемой смещаемым или деформируемым объектом с рассеивающей поверхностью, на основе цифровой записи изображений несмещенной и смещенной спекл-структур и их пространственного частотного анализа с использованием численно задаваемых фазовых сдвигов и корреляционного анализа пространственных спектров спекл-структур.

L.A. MAKSIMOVA<sup>1</sup>, P.V. RYABUKHO<sup>1,2</sup>, N.Yu. MYSINA<sup>1</sup>,  
V.P. RYABUKHO<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Precision Mechanics and Control of the RAS, Saratov*  
<sup>2</sup>*Saratov National Research State University*

## **DETERMINATION OF SUB-PIXEL MICRODISPLACEMENTS OF SPECKLE-STRUCTURES BASED ON PHASE ANALYSIS OF THEIR SPATIAL SPECTRUM**

The method for determining sub-pixel displacement of speckle-structure is presented. Speckle-structures are formed in consequence of displacement or deformation of object with scattering surface. Digital recording images of initial and shifted speckle-structures and their spatial frequency analysis are used. The numerical input phase shifting and spatial correlation analysis of speckle-structure spectra are used.

В настоящее время широко используются методы спекл-интерферометрии [1] с цифровой записью и обработкой изображений спекл-картин. Пиксельная структура матрицы фотодетектора применяется в качестве средства прямых линейных измерений смещения. Преобразование в частотную область позволяет получить измеряемые величины с субпиксельной точностью по распределению интенсивности дифракционного гало (рис. 1а и 1б) [2] или по наклону линейного участка графика функции фазового набега в поле пространственного спектра смещенной спекл-структуры (рис. 1в, смоделированная картина). Для

реальных условий графики функции фазового набега (рис. 2) получены путем усреднения по 300 построчным реализациям вдоль соответствующей оси. Усреднение необходимо для уменьшения шумовой составляющей, возникающей в оптической системе. С помощью фазового сдвига  $\Delta\phi$  можно определить смещение графиков вдоль каждой оси  $\Delta\xi$ ,  $\Delta\eta$  и определить смещение спекл-структуры по формуле  $\Delta x = \Delta\phi M / (2\pi \Delta\xi)$  [2], где  $M$  – размер матрицы.

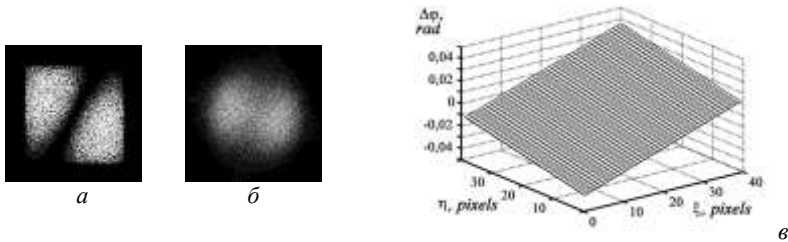


Рис. 1. Дифракционное гало: смоделированное  $\Delta x = 0,2$  и  $\Delta y = 0,1$  пикс (а), полученное в эксперименте, смещение спекл-структуры  $\Delta r = 0,4$  пикс (б); фрагмент функции фазового набега пространственного спектра (в)

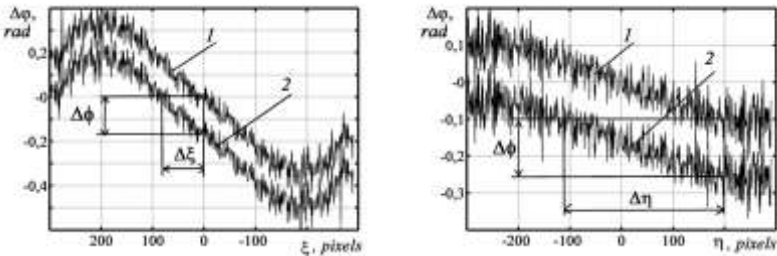


Рис. 2. Графики функции фазового набега, смещение спеклов  $\Delta r = 0,4$  пикс :

1 – без фазового сдвига, 2 – с дополнительным фазовым сдвигом  $\Delta\phi = -\pi/20$  рад;  $\Delta\xi \approx 83$  пикс,  $\Delta\eta \approx 310$  пикс,  $\Delta x = 0,386$  и  $\Delta y = 0,103$  пикс

Предложенный в работе метод реализации интерференционных измерений позволяет расширить диапазон производимых измерений в сторону малых смещений и может быть эффективно использован на практике.

#### Список литературы

1. Optical inspection of microsystems / ed. by W. Osten. Taylor & Francis Group, 2007.
2. Максимова Л.А., Рябухо П.В., Мысина Н.Ю., Рябухо В.П. // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика 2015. Т.15. В.3. С.5-11.

Д.А. ПОЛЕТАЕВ, Б.В. СОКОЛЕНКО, А.О. КОВАЛЕВА,  
Н.В. ПЕТРОВ<sup>1</sup>, И.А. ШЕВКУНОВ<sup>1</sup>  
*Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь*  
<sup>1</sup>*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ В АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ**

В работе проводится оценка возможности применения спекл-интерферометрии для археологических исследований и приводится методика ее проведения.

D.A. POLETAEV, B.V. SOKOLENKO, A.O. KOVALYOVA,  
N.V. PETROV<sup>1</sup>, I.A. SHEVKUNOV<sup>1</sup>  
*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol*  
<sup>1</sup>*ITMO University, Saint-Petersburg*

## **APPLICATION OF SPECKLE INTERFEROMETRY IN ARCHAEOLOGICAL RESEARCH**

In this paper we evaluated the possibility of using speckle interferometry for archaeological research and the technique of its implementation.

Археологические исследования нуждаются в точной и простой методике датирования находок. Наиболее точным методом датирования является радиоуглеродное [1]. Однако он требует применения громоздкой аппаратуры и не может проводиться в полевых условиях. Современные оптические методы позволяют довольно точно проводить качественный и количественный анализ образцов. Представляется целесообразным проводить сравнение оптическими методами однотипных археологических находок, датированных радиоуглеродным методом, с вновь найденными непосредственно во время полевых работ для отнесения к тому или иному периоду. Это позволит повысить точность археологических исследований и точнее устанавливать границы проведения раскопок.

Целью работы является анализ возможности применения спекл-интерферометрии в археологических исследованиях. Наиболее удобной и применимой для качественного и количественного анализа археологических образцов представляется именно спекл-интерферометрия [2]. Это обусловлено ее широкими возможностями и

значительной гибкостью при проведении эксперимента [3]. Оптическая микроскопия значительно уступает данному виду диагностики по информативности [4]. Схема предлагаемой экспериментальной установки представлена на рис. 1, где обозначено: л – лазер, о – исследуемый объект, к – камера. Предполагается использование лазера с длиной волны 650 нм, мощностью 10 мВт, и камеры VNI-552-A3-VS.

Методика проведения эксперимента следующая. С эталонного образца, дата которого известна, снимается интерференционная картина распределения спеклов (по схеме рис. 1), которая записывается в память компьютерной системы. Вновь найденный, при проведении археологических раскопок, образец аналогичной структуры помещается в экспериментальную установку (схема на рис. 1) и с него снимается интерференционная картина. Программным методом производится сравнение полученных изображений. При совпадении интерференционных картин, делается вывод о сходной датировке обоих находок.

Представленные в данной работе научные результаты получены в ходе реализации академической мобильности на базе ФГАОУ ВО Университет информационных технологий, механики и оптики в рамках проекта «Академическая мобильность молодых ученых России – АММУР».

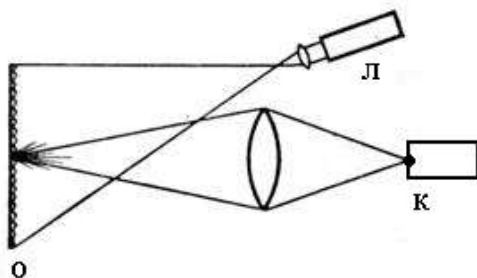


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

*Список литературы*

1. Stuiver M., Reimer P.J., Braziunas T.F. // Radiocarbon. 1998. V.40. P.1127-1151.
2. Bhaduri B., Quan C., et. al. // Applied optics. 2010. V.49 (18).
3. Максимова Л.А., Мысина Н.Ю. и др.// Изв. Саратовского университета. 2011. Т.11 (2).
4. Mironova T.V., Sultanov T.T., Zubov V.A. // Journal of russian laser research. 2004. V.25 (6). P.495-510.

В.В. ДЁМИН, И.Г. ПОЛОВЦЕВ, Д.В. КАМЕНЕВ,  
А.С. КОЗЛОВА, А.Л. ОЛЕНИН<sup>1</sup>

*Национальный исследовательский Томский государственный университет  
<sup>1</sup>Институт океанологии РАН им. П.П. Ширинова, Москва*

**НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ  
АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА  
ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПЛАНКТОНА  
В ПРИРОДНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ**

В работе представлены результаты натуральных испытаний аппаратно-программного комплекса в Карском море. Получены зависимости концентрации и распределения планктона по размерам в зависимости от глубины погружения устройства для различных стоянок судна.

V.V. DYOMIN, I.G. POLOVCEV, D.V. KAMENEV,  
A.S. KOZLOVA, A.L. OLENIN<sup>1</sup>

*National Research Tomsk State University  
<sup>1</sup>P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Moscow*

**APPROBATION OF HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX  
FOR PLANKTON INVESTIGATION  
IN NATURAL WATER RESERVOIR**

The results of hardware and software complex approbation in Kara Sea is considered. The dependences of plankton concentration and size distribution from diving depth and location are obtained.

В настоящее время голографические методы находят применения в различных областях науки и техники, в частности, используются для исследования планктона в естественной среде обитания. Уникальность методов заключается в том, что они позволяют одновременно зарегистрировать большой объём с частицами, при этом сохранив высокое разрешение.

Для исследования планктона в Томском государственном университете разработан аппаратно-программный комплекс, позволяющий в режиме реального времени регистрировать и обрабатывать цифровые голограммы планктона, извлекать информацию о концентрации планктона и его распределении по размерам. Кроме этого,



устройство оснащено датчиками, измеряющими гидрофизические параметры (температура, давление, солёность), повышающими информативность результатов исследования. Данный комплекс успешно прошёл испытания при глубине погружения до 250 м.

В докладе рассмотрены:

- оптическая и функциональная схема устройства
- особенности обработки и извлечения информации из цифровых голограмм планктонных частиц
- результаты экспедиции в район Карского моря



Рис. 1. Аппаратная часть комплекса для исследования планктона в природных водных объектах

Д.С. ГОНЧАРОВ, Е.К. ПЕТРОВА, Н.М. ПОНОМАРЕВ,  
Р.С. СТАРИКОВ, Д.В. ШАУЛЬСКИЙ  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИНВАРИАНТНОГО КОРРЕЛЯЦИОННОГО ФИЛЬТРА С МАКСИМАЛЬНОЙ СРЕДНЕЙ ВЫСОТОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОГО ПИКА**

На основе искусственного набора истинных изображений синтезирован фильтр с максимальной средней высотой корреляционного пика (МСВП), инвариантный к повороту, а также проведены эксперименты по распознаванию истинных изображений.

D.S. GONCHAROV, E.K. PETROVA, N.M. PONOMAREV,  
R.S. STARIKOV, D.V. SHAULSKIY  
*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)*

## **SYNTHESIS AND INVESTIGATION OF INVARIANT MAXIMUM AVERAGE HEIGHT CORRELATION FILTER**

Based on the artificial set of real images a filter with a maximum average height of the correlation peak (MACH) was synthesized and also experiments on the recognition of the true image were conducted.

Инвариантные корреляционные фильтры являются одним из наиболее перспективных инструментов в распознавании изображений. Существует несколько подходов к синтезу корреляционных фильтров, в частности, синтез фильтров, основанных на максимизации отклонения высоты корреляционного пика от ее среднего значения для всего набора, используемого в синтезе фильтра. Одним из таких фильтров является фильтр с максимальной средней высотой корреляционного пика (МСВП или MACH – maximum average correlation height filter). Преимущество данного фильтра – устойчивость к шуму в совокупности со слабо отличающимися друг от друга значениями высоты корреляционного пика для истинных изображений, превышающими величину корреляционных пиков для ложных изображений [1]. Кроме того, преимущество данного фильтра перед многими другими в том, что для его синтеза требуется лишь набор истинных изображений, какие-либо ложные изображения не требуются [2].

Фильтр синтезировался на основе ограниченного числа изображений истинного объекта (размер каждого – 256x256 пикселей, глубина цвета – 8 бит), после чего тестировался с набором изображений истинного объекта (отличным от набора, использовавшегося при синтезе фильтра) и несколькими наборами изображений ложных объектов. Эксперименты проводились также для наборов изображений с аддитивным гауссовым белым шумом. В результате экспериментов были получены величины корреляционных пиков для изображений истинных и ложных объектов с шумом и без него. На основе этих результатов были построены графики, для каждого из которых были рассчитаны порог и вероятность ошибки (график для одного из экспериментов приведен на рис. 1).

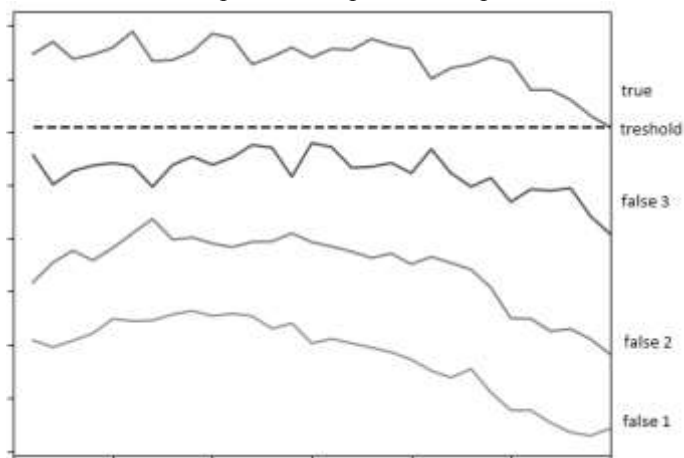


Рис. 1. График величин корреляционных пиков для 4 объектов, каждому из которых соответствовало 30 изображений

Исследование фильтра показало, что, несмотря на хорошие результаты работы фильтра во многих случаях (особенно при распознавании зашумленных изображений), фильтр нуждается в усовершенствовании, т.к. для некоторых наборов изображений вероятность ошибки оказывается большой величиной. Некоторые методы улучшения фильтра описаны в [1].

#### *Список литературы*

1. Kerekes R.A., Vijaya Kumar B.V.K. Selecting a composite correlation filter design: a survey and comparative study. // Optical Engineering. 2008. 47(6).
2. Vijaya Kumar B.V.K., Mahalanobis A., Juday R. Correlation Pattern Recognition. New York: Cambridge University Press, 2005.

Д.Г. ДЕНИСОВ, В.В. НАГОВИЦЫН, В.Я. МЕНДЕЛЕЕВ<sup>1</sup>  
*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*  
<sup>1</sup>*Объединённый институт высоких температур РАН, Москва*

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ФОРМЫ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ**

В данной работе было проведено сравнение двух современных методов бесконтактного контроля параметров формы сложнопрофильных технологических изделий. Приведено описание специфики работы двух методов бесконтактного контроля, составлена таблица по достижимым значениям параметров опτικο-электронных приборов.

D.G. DENISOV, V.V. NAGOVITSYN, V.Ya. MENDELEEV<sup>1</sup>  
*Bauman Moscow State Technical University*  
<sup>1</sup>*Joint Institute for High Temperatures of the RAS, Moscow*

## **A COMPARATIVE ANALYSIS OF OPTOELECTRONIC SYSTEMS FOR REMOTE CONTROL OF PARAMETERS OF COMPLEX-FORMS TECHNOLOGICAL PRODUCTS**

In this work we compared two modern methods of remote control of parameters of complex-forms technological products. There are the description of the specific of two methods for remote control, a table at the attainable values of parameters of optical-electronic devices.

Принцип работы триангуляционных лазерных измерителей основан на методе определения расстояния между контролируемым объектом и приемным каналом системы с использованием тригонометрических соотношений в треугольнике. В зависимости от удаленности объекта угол триангуляции изменяется, происходит смещение изображения светового пятна на плоскости регистрации изображения. Точность определения расстояния до поверхности определяется точностью определения координаты центра пятна в плоскости фотоприемника. Распределение интенсивности света по сечению пятна на поверхности объекта зависит от параметров пучка, а также от наклона и формы исследуемой поверхности [1, 2]. В методе конскопической голографии [3] лазерный луч проецируется на тестируемый объект. Из каждой светоотражающей точки

объекта возникает рассеянная волна, и ее радиус соответствует расстоянию  $z$  между объектом и плоскостью анализа. Коноскопический узел [3] преобразует падающий на объект исследования волновой фронт на две плоские линейно поляризованные волны, которые интерферируют в обратном ходе при отражении от объекта исследования (рис. 1).



Рис. 1. Принцип работы коноскопического узла

В результате формируется интерференционная картина, которая и анализируется для определения статистических параметров исследуемой поверхности. Сравнительный анализ рассмотренных методов представлен в табл. 1.

Таблица 1

Метод	Триангуляционный	Коноскопическая голография
Типовые характеристики		
Диапазон измерений	0 – 200 мм	0-300 мм
Погрешность измерений	0,01 – 1 мм	0,005 – 1 мм
Быстродействие, сек	$10^{-3}$	$10^{-4}$

*Список литературы*

1. Бердин В.К. // Вестник УГАТУ. 2011. Т.15. №4. С.175-180.
2. Барышников Н.В., Денисов Д.Г., Животовский И.В., Менделеев В.Я. Теоретическое и экспериментальное исследование триангуляционного метода измерения формы поверхности // Метрология. 2014. №11. С.3-14.
3. Frade M., Enguita J.M., Alvarez I., Rodriguez-Jimenez S. Fringe pattern characterization by OPD analysis in a lateral shearing interferometric profilometer. // Proc. SPIE. 2011. V.8082. P. 1-12.

Н.Т. АВЛАСЕВИЧ, А.И. БУТЬ, А.М. ЛЯЛИКОВ

*Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Беларусь*

## **ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ МИКРОСТРУКТУР**

Представлены результаты по разработке лазерного интерферометра, предназначенного для измерительного контроля параметров одно- и многомерных периодических микроструктур.

N.T. AVLASEVICH, A.I. BUT, A.M. LYALIKOV

*Janka Kupala State University, Grodno, Belarus*

## **INTERFEROMETER FOR MEASURING CONTROL OF PERIODIC MICROSTRUCTURES**

The results on the development of the laser interferometer designed for measuring and monitoring single-parameter multidimensional periodic microstructures.

В последнее время отмечается определенный интерес к объектам, имеющим одно и многомерную периодическую структуру. Это дифракционные оптические элементы, микролинзовые растрсы, поверхности полупроводников и металлов с субмикронными структурами, сформированными лазерным излучением, магнитные пленки с полосовой доменной структурой и т.д.

В данной работе представлены результаты по созданию лазерного интерферометра, предназначенного для измерительного контроля параметров микроструктур пропускающего типа.

На рис. 1 изображена оптическая схема разработанного устройства, содержащую гелий-неоновый лазер LS, телескопическую систему в виде микрообъектива LM, пространственного фильтра SF<sub>1</sub>, установленного строго в задней фокальной плоскости микрообъектива и представляющего собой непрозрачный экран с отверстием 20 мкм, и линзу L<sub>1</sub>. Формирование объектного и опорного световых пучков в устройстве реализовано на базе классического интерферометра Маха-Цендера, выполненного в виде пар светоделительных кубиков BS<sub>1</sub>, BS<sub>2</sub> и зеркал M<sub>2</sub>, M<sub>3</sub>.

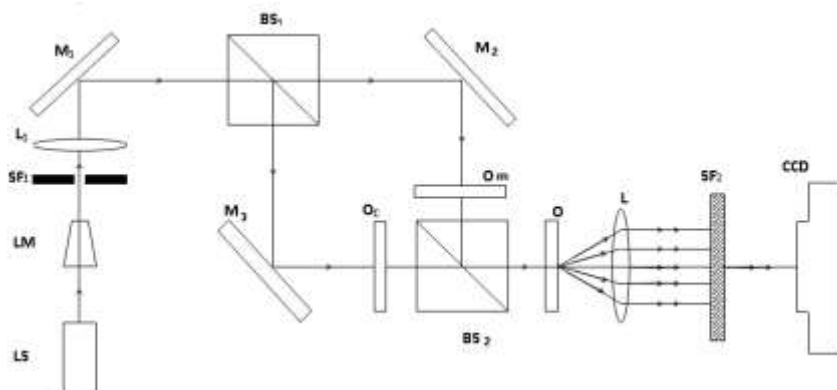


Рис. 1. Оптическая схема разработанного лазерного интерферометра

Для изучения профиля поверхности, а также визуализации микроскопических дефектов, одиночная прозрачная микроструктура устанавливается в положение  $O$ . В случае наличия значительной кривизны поверхности микроструктуры, а также отступления периодичности от постоянной величины выявление отклонений профиля поверхности и периодичности от нормы дополнительно используется эталонная микроструктура. В этом случае контролируемая и эталонная микроструктуры устанавливаются в положениях  $O_c$  и  $O_m$ . Выделение дифракционных порядков света на периодических микроструктурах осуществляется оптической системой виде линзы  $L_2$  и непрозрачного экрана  $SF_2$  с отверстием. Интерференционные картины, отображающие профиль поверхности микроструктуры или макродефекты, формируются в оптически сопряженной со структурами  $O$  или  $O_c$ ,  $O_m$  посредством линзы  $L_2$  плоскости и регистрируются цифровой камерой.

Разработанный лазерный интерферометр позволяет реализовать различные способы отображения профиля поверхности микроструктуры или макродефектов с использованием как одиночной [1], так и нескольких [2] периодических микроструктур.

#### Список литературы

1. Ляликов А.М., Серенко М.Ю. Использование систем оптической диагностики фазовых объектов для дефектоскопии периодических структур. // Оптический журнал. 2000. Т.67. №6. С.111-114.
2. Ляликов А.М. Визуализация дефектов отдельных компонент тонких композитных элементов с одномерной дифракционной структурой. // Журнал технической физики. 2015. Т.85. №12. С.114-119.

Д.Г. ДЕНИСОВ, А.А. ДЖУМАМУРАТОВА,  
А.В. ЛАРИЧЕВ<sup>1</sup>, Д.А. МАРТЫНОВА

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

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

## **МЕТОД И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЕ УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ИНТРАОКУЛЯРНЫХ ЛИНЗ**

Предлагается оригинальное схемотехническое решение по разработке модернизированной функциональной схемы измерительного прибора, включающего в свой состав каналы автоколлиматора и датчика волнового фронта типа Шэка - Гартмана (ДВФ). Данный подход позволит минимизировать погрешность измерения параметров качества (высотных статистических показателей профилей) исследуемых интраокулярных линз в широком динамическом диапазоне контроля.

D.G. DENISOV, A.A. DGUMAMURATOVA,  
A.V. LARICHEV<sup>1</sup>, D.A. MARTYNOVA

*Bauman Moscow State Technical University*

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

## **METHOD AND OPTOELECTRONIC DEVICE CONTROLLING INTRAOCULAR LENS OPTIONS**

It offers original circuit solution for the development of a modernized functional diagram of the measuring device, which includes in its membership channels autocollimator and Shake - Hartmann wavefront sensor (SHWFS). This approach minimizes the error of measurement of the quality parameters (altitude profiles of statistical indicators) study of intraocular lenses in a wide dynamic range control.

Интраокулярная линза (ИОЛ) – искусственный хрусталик – пластиковая линза, имплантируемая в глаз для замены собственного хрусталика по причине его помутнения вследствие катаракты. ИОЛ состоит из оптической части и опорных элементов, которые удерживают ее в глазу.

Имплантация ИОЛ является наиболее эффективным способом коррекции зрения после удаления катаракты. Она позволяет не только получить высокую остроту зрения, но и избавляет от чувства дискомфорта, испытываемого при ношении очков с толстыми стеклами. Кроме того, введение в глаз искусственного хрусталика избавит от



необходимости покупать контактные линзы и средства ухода за ними или дорогостоящие очки.

С развитием хирургии катаракты разрабатывались различные типы интраокулярных линз. На сегодняшний день существует множество видов ИОЛ, отличающихся по форме, размерам и материалу, из которого они изготовлены, весу, цвету, способу фиксации на глазу и пр. Выбор оптимальных оптических характеристик интраокулярных линз является ещё нерешённой задачей. Решить её только теоретически невозможно, поскольку выбор таких характеристик является строго индивидуальным для конкретного пациента, особенно если он перенёс рефракционную операцию. Для обеспечения высоких точностных показателей в требуемом динамическом диапазоне при заданных условиях измерения в настоящей научно-исследовательской работе были проанализированы технические характеристики и состав аппаратуры двух функциональных схем оптико-электронных приборов (ОЭП) контроля ИОЛ, компании «Trioptics» OptiSpheric IOL, WaveMaster IOL на базе которых предложена модернизированная функциональная схема и метод диагностики параметров ИОЛ. В результате проведённых исследований показана возможность применения ДВФ в задачах контроля абберрационных характеристик ИОЛ относительно опорного радиуса кривизны в плоскости линзового растра в широком динамическом диапазоне измерений [1-4].

#### *Список литературы*

1. Nikitin A.N., Kudryashov A.V., Sheldakova J., Denisov D.G., Karasik V.E., Sakharov A.A. Hartmannometer vs Fizeau interferometer: advantages and drawbacks // SPIE Conferences and Exhibitions Photonics West -2015. San Francisco, USA, 2016. P.9369-5.
2. Nikitin A.N., Sheldakova J., Kudryashov A.V., Borsoni G., Denisov D.G., Karasik V.E., Sakharov A.A. A device based on the Shack-Hartmann Wave Front sensor for testing wide aperture optics // SPIE Photonics West, Opto, Photonic Instrumentation Engineering III. San Francisco, USA, 2016. P.97540K-01;
3. Барышников Н.В., Денисов Д.Г., Карасик В.Е., Сахаров А.А. Метод и аппаратура аттестационного контроля радиусов кривизны сферических поверхностей оптических изделий при помощи датчика волнового фронта. // V Международная конференция по фотонике и инфракрасной оптике. Сборник научных трудов. 2016. С.416-417.
4. Денисов Д.Г., Карасик В.Е., Кудряшов А.В., Никитин А.Н., Сахаров А.А. Оптико-электронная система на основе датчика волнового фронта для диагностики параметров формы оптических изделий. // Лазеры в науке, технике, медицине. Сборник научных трудов XXVI Международной конференции. 2015. С.86-90.

К.Д. РЯБОВ, О.О. МЯКИНИН, А.Ю. ГУСЕЙНОВ<sup>1</sup>,

В.П. ЗАХАРОВ, А.Г. ХРАМОВ

*Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева*

<sup>1</sup>*Глазная клиника Бранчевского, Самара*

## **СЕГМЕНТАЦИЯ ТРЁХМЕРНЫХ ОКТ СНИМКОВ МЕТОДОМ АКТИВНЫХ СФЕР**

Разработан метод сегментации трёхмерных изображений, основанный на деформируемых поверхностях. Предназначение метода – выделение патологии на трёхмерном ОКТ снимке для вычисления её объёма. Приведены результаты экспериментов на фантомных изображениях и ОКТ снимках.

K.D. RYABOV, O.O. MYAKININ, A.Yu. GUSEINOV<sup>1</sup>,

V.P. ZAKHAROV, A.G. KHRAMOV

*Samara National Research University*

<sup>1</sup>*Branchevsky Eye Clinic, Samara*

## **AN ACTIVE SPHERE METHOD FOR 3D OCT IMAGES SEGMENTATION**

We describe a method for 3D image segmentation based on deformable surfaces. The method is designed for pathology volume evaluation on 3D OCT scan. We present results of experiments on phantoms and OCT scans.

Оптическая когерентная томография (ОКТ) эффективно применяется в офтальмологии и дерматологии и позволяет получать трёхмерные изображения внутренней структуры тканей в высоком разрешении [1]. Такие изображения позволяют исследовать патологии в коже и сетчатке. Во врачебной практике иногда ставится задача нахождения объёма патологии по трёхмерному ОКТ-снимку. Так как параметры сканирования известны, задача сводится к сегментации трёхмерного изображения. В этой работе для нахождения границ патологии предлагается алгоритм, основанный на деформируемых поверхностях [2, 3].

Предлагаемый алгоритм предполагается использовать для сегментации изображений отёка сетчатки и базалиомы. Полости отёка и гнёзда базалиомы имеют форму деформированной сферы и низкорелективны – на ОКТ выглядят как тёмные области [4]. Эта априорная информация использована в предложенном алгоритме сегментации.

Алгоритм использует деформируемую модель, представляющую собой поверхность в трёхмерном пространстве. Поверхность движется под воздействием определённых сил, учитывающих в том числе предполагаемую форму объекта и соотношение яркости объекта и фона. Начальная поверхность помещается на трёхмерном изображении внутрь патологии пользователем, после чего она начинает расширяться и останавливается у границ патологии.

Для того, чтобы остановить расширение поверхности в областях слабо выраженной границы применяется ввод пользователем ограничивающих контуров на одном или нескольких В-сканах.

Для исследования разработанного алгоритма используется имитационная модель, генерирующая фантомные трёхмерные изображения тёмного объекта на светлом фоне с добавлением шума и размытия. Объём объекта известен, что позволяет автоматически оценивать погрешность нахождения объёма.

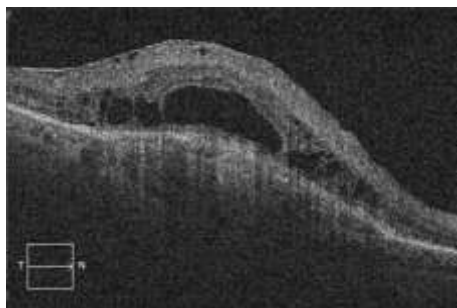


Рис. 1. В-скан ОКТ снимка отёка сетчатки

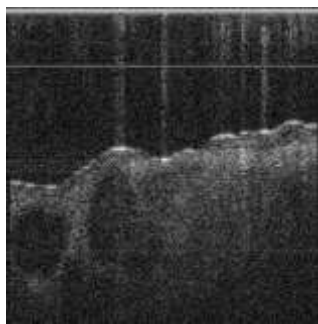


Рис. 2. В-скан ОКТ снимка образца кожи с базальноклеточной карциномой

#### *Список литературы*

1. Huang D., Swanson E.A., Lin C.P., Schuman J.S., Stinson W.G., Chang W., Hee M.R., Flotte T., Gregory K., Puliafito C.A., et al. Optical coherence tomography // Science. 1991. P.1178-1181.
2. Kaas M, Witkin A., Terzopoulos D. Snakes: Active Contour Models // Int. Journal of Computer Vision. 2014. 1987. P.312-331 ()
3. Neuenschwander W.M. Elastic Deformable Contour and Surface Models for 2-D and 3-D Image Segmentation. PhD thesis. Zurich: Eidgen ossische Techn. Hochschule, 1995.
4. Cheng H.M., Guitera P. Systematic Review of Optical Coherence Tomography Usage in the Diagnosis and Management of Basal Cell Carcinoma // The British Journal of Dermatology. 2015. P.1371-1380.

С.Н. МЕНСОВ<sup>1,2</sup>, Ю.В. ПОЛУШТАЙЦЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского*

<sup>2</sup>*Институт металлоорганической химии им. Г.А. Разуваева РАН,  
Нижний Новгород*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ГЛУБИНЫ РЕЗКОСТИ ПРОЕКЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Разработан способ формирования резкого изображения объёмных предметов или глубоких сцен, превосходящих дифракционную глубину резкости используемой оптической системы. Область применения способа – оптическая микроскопия, системы видеонаблюдения, расширение возможностей стандартной фототехники и прочих фоторегистрирующих устройств, оснащённых объективом.

S.N. MENSOV<sup>1,2</sup>, Yu.V. POLUSHTAYTSEV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod*

<sup>2</sup>*Razuvaev Institute of Organometallic Chemistry of RAS, Nizhny Novgorod*

## **USING SPACE-FREQUENCY FILTERING TO INCREASE THE DEPTH OF FIELD OF THE PROJECTION SYSTEM**

We developed a method to obtain a sharp image of volumetric samples or deep scenes exceeding the diffraction depth of field of the used optical system. The method could be applied in optical microscopy, video surveillance systems, enhancement of standard photographic equipment and other photorecording devices equipped with lens.

Одним из основных методов, используемых в настоящее время для построения изображения, является формирование оптических проекций при помощи линзовых систем (объективов). Однако к их существенным недостаткам можно отнести снижение резкости изображения объекта в случае его продольного смещения из сечения наилучшей фокусировки (оптически сопряжённой плоскости). Этим обусловлена проблема получения резкого изображения объёмных предметов или глубоких сцен – если высота рельефа объекта исследования (или глубина сцены) превосходит глубину резкости используемой оптической системы, то добиться приемлемой чёткости по всей площади изображения не удаётся.

Однако, современные оптические приборы, как правило, оснащаются системой настройки резкости и комплектуются оптико-электронными преобразователями, позволяющими получать изображения в цифровом

формате. В таких системах могут быть реализованы методы формирования изображения объёмного объекта без применения специальных оптических элементов, изменяющих передаточную характеристику проекционной оптической системы. Предлагаемый способ [1] заключается в процессорной обработке серии снимков, полученных при послойном сканировании по глубине сцены, пространственно-частотной фильтрации изображений, их масштабировании и реконструкции резкого изображения из суммарного пространственного спектра всех слайдов. Подход основан на численных методах, не использующих ресурсоёмкое сегментирование. В качестве примера на рис. 1 представлен результат восстановления резкого изображения протяжённого объекта – стола, включая предметы на переднем и на заднем плане. Проведённые нами теоретические исследования показали, что разрабатываемый метод позволит получить изображение объёмного объекта или глубокой сцены с неограниченной глубиной резкости.

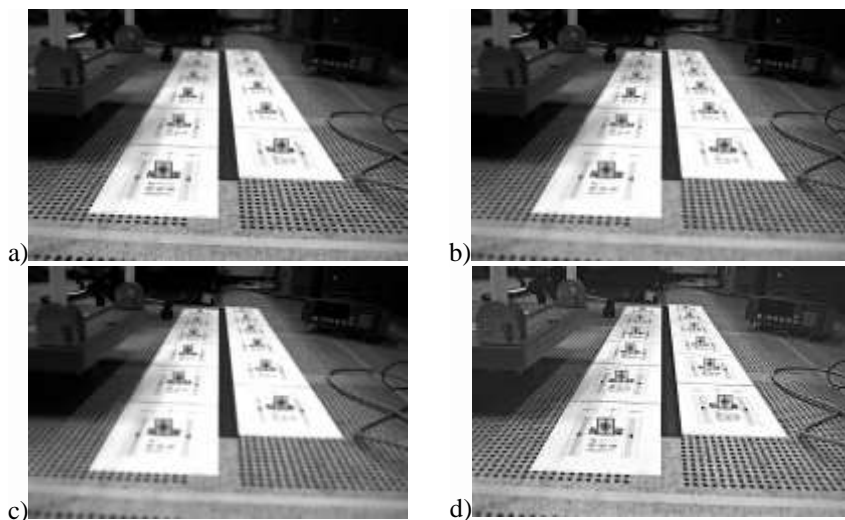


Рис. 1. Пример реконструкции резкого изображения (d) по серии снимков (a)–(c), полученных при перестройке резкости оптической системы

*Список литературы*

1. Менсов С.Н., Полуштайцев Ю.В. Способ формирования изображения объёмных объектов или глубоких сцен и устройство для его осуществления. Патент РФ. N 2544784.

А.И. БУТЬ, А.М. ЛЯЛИКОВ

*Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Беларусь*

## **ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ОСТАТОЧНОЙ КЛИНОВИДНОСТИ ПРОЗРАЧНЫХ ПОДЛОЖЕК ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Показано, что использование перезаписи в нелинейных условиях исходных голограмм подложки дифракционного оптического элемента малых линейных размеров позволяет восстановить интерференционную картину, отображающую остаточную клиновидность подложки дифракционного элемента, с повышением чувствительности измерений в 32 раза.

A.I. BUT, A.M. LYALIKOV

*Janka Kupala State University, Grodno, Belarus*

## **INCREASE OF SENSITIVITY MEASUREMENTS OF RESIDUAL WEDGING TRANSPARENT SUBSTRATES OF DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS**

It is shown that the use of an overwrite at nonlinear conditions of starting substrate hologram diffraction optical element small linear dimensions allows to restore interference pattern displaying a residual wedging diffraction element substrate, with an increase in measurement sensitivity by 32 times.

В голографической интерферометрии для повышения чувствительности измерений на стадии формирования интерференционной картины используют волны, дифрагированные на нелинейных голограммах в высшие порядки [1]. Во многих случаях получение голограмм, имеющих высокий контраст полос голографической структуры с высокоэффективными высшими порядками дифракции, является технически сложной задачей. Примером такого случая является запись голограммы фазового микрообъекта при наличии рассеянного света, создаваемого как самим микрообъектом, так и его структурой.

В данной работе показана возможность повышения чувствительности измерений при оценке остаточной клиновидности прозрачных подложек дифракционных оптических элементов (ДОЭ) малых поперечных размеров (6x3мм). Оценка остаточной клиновидности пластины,

связанной с обработкой подложки и нанесением полимерной пленки, традиционными интерференционными методами [2, 3] не позволяла получить достоверный результат из-за недостаточной чувствительности способов. Применение известных способов повышения чувствительности интерференционных измерений [4], включающих запись, обработку голограммы пластины, из-за низкой дифракционной эффективности голограммы также не принесло ожидаемого результата.

В предложенной методике в интерферометре Маха-Цендера записывались две голограммы ДОЭ. Причем, одна из голограмм получена после разворота вокруг нормали к поверхности клиновидной пластины на угол  $180^\circ$ , что позволяло использовать прием повышения чувствительности измерений угла клиновидности пластины [4].

Для улучшения качества исходных голограмм ДОЭ была использована методика перезаписи голограмм двумя пучками когерентного света также при нелинейных условиях. Полученные голограммы в последующем восстанавливались по методике восстановления интерференционных картин описанной в работе [4]. При оптической обработке перезаписанных голограмм формировалась интерференционная картина, отображающая остаточную клиновидность прозрачной подложки дифракционного оптического элемента (рис. 1б).

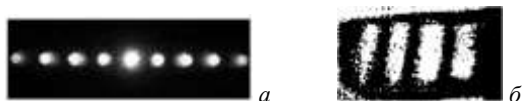


Рис. 1. Дифракционный спектр перезаписанных голограмм подложки ДОЭ (а) и интерференционная картина, восстановленная при их оптической обработке с выделением волн, дифрагированных в  $\pm 4$ -е порядки (б)

На рис. 1а представлена картина дифракционного спектра одной из перезаписанных голограмм, наблюдаемая на экране. Из картин видно, что перезапись голограммы позволила достичь высокой дифракционной эффективности высших порядков дифракции на перезаписанной голограмме и повысить чувствительность измерения при последующей обработке в 32 раза.

#### *Список литературы*

1. Вест Ч. Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982.
2. Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Е. Оптические измерения: учебник для вузов. М.: Машиностроение, 1987.
3. Мошкин Б.Е., Майоров Б.С. // Оптический журнал. 2007. Т. 74. №2. С.24-27.
4. Буть А.И., Ляликов А.М. // Письма в ЖТФ. 2011. Т.37. Вып.17. С.51-57.

В.В. КОЛЮЧКИН, С.Б. ОДИНОКОВ

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

## **МЕТОД КОСВЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗАЩИТНЫХ ГОЛОГРАММ С УЧЁТОМ СЛУЧАЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ ФОРМЫ ПРОФИЛЯ МИКРОРЕЛЬЕФА**

Представлен метод контроля качества защитных голограмм, основанный на косвенном измерении параметров элементарных дифракционных решеток с учётом отклонения реальной формы профиля микро рельефа от идеальной.

V. V. KOLYUCHKIN, S. B. ODINOKOV

*Bauman Moscow State Technical University*

## **THE METHOD OF INDIRECT MEASUREMENTS OF SECURITY HOLOGRAM PARAMETERS CONSIDERING THE INFLUENCE OF DIFFRACTION GRATINGS RELIEF DISTORTION**

The method of security hologram quality inspection based on the indirect way of diffraction gratings parameters measurement is presented.

В работе [1] был рассмотрен метод косвенного измерения таких параметров дифракционных решёток (ДР) защитных голограмм (ЗГ), как глубина  $d$  и пространственный период  $T$ . Известно, что при заданной длине волны  $\lambda$  и фиксированном значении пространственного периода  $T$  распределение интенсивности по порядкам дифракции на фазовой отражающей дифракционной решетке зависит от глубины  $d$  рельефа ДР. Было показано, что, зарегистрировав с помощью приёмника излучения пространственные координаты и значения интенсивности двух порядков дифракции, можно определить пространственный период и глубину фазового рельефа контролируемой дифракционной решётки.

Но реальный профиль фазового рельефа отличается от идеализированного периодического, например, «синусоидального» и представляет собой реализацию случайного поля. Поэтому окончательный ответ на вопрос о возможности реализации косвенного метода измерения параметров, можно дать только после анализа влияния отклонений, искажающих профиль фазового рельефа элементарных дифракционных решёток.



В рамках скалярной теории дифракции [2, 3] было разработано математическое описание явления дифракции плоской монохроматической волны на отражающей ДР, фазовый рельеф которой имеет случайные отклонения от заданного идеального профиля. Выведены математические выражения для расчёта значений интенсивности порядков дифракции с учётом случайных искажений фазового рельефа ДР. Предложено случайные искажения фазового рельефа ДР ЗГ описывать нормированной корреляционной функцией.

Чтобы определить параметры, характеризующие форму профиля фазового рельефа, в том числе, оценить параметры помехи рельефа, разработана методика обработки данных прямых измерений.

Параметры аппроксимации идеализированного фазового рельефа можно представить в виде вектора  $\vec{P} = (C, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, T_0, \varphi_0)^T$ , характеризующего его форму. Параметры, характеризующие нормированную корреляционную функцию случайных искажений удобно представлять вектором  $\vec{P}_N = (\sigma_\xi, k_p, b_1, b_2, \gamma_1, \gamma_2)^T$ , где  $k_p, b_1, b_2, \gamma_1, \gamma_2$  – параметры аппроксимации,  $\sigma_\xi$  – СКО случайных искажений.

Разработан макетный образец опико-электронного прибора, контроля качества ЗГ, позволяющий определять пространственный период и глубину микрорельефа ДР ЗГ. Адекватность принятого математического описания подтверждена в процессе экспериментальных исследований с помощью разработанного макета прибора.

Работа выполнена в МГТУ им. Н.Э. Баумана при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения проектной части государственного задания (проект № 14.577.21.0223).

#### *Список литературы*

1. Колочкин В.В., Злоказов Е.Ю., Одинокоев С.Б., Талалаев В.Е., Цыганов И.К. Метод когерентного контроля глубины поверхностного микрорельефа голограммных и дифракционных оптических элементов // Компьютерная оптика. 2015. Т.39. №4. С.515-520.
2. Хорохоров А.М., Клишук А.М., Цыганов И.К., Одинокоев С.Б., Ширанков А.Ф. Исследование влияния параметров фазовых дифракционных решеток на распределение интенсивности дифрагированного света при формировании цветкокодированных изображений // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2005. №4. С.13-26.
3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. Изд. 2-е. М.: Наука, 1973.

М.В. АУНГ, Б.С. РИНКЕВИЧЮС, И.Н. ПАВЛОВ

*Национальный исследовательский университет «МЭИ»*

## **ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ФОРМЫ И ДЕФОРМАЦИИ ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ПОМОЩЬЮ СТРУКТУРИРОВАННОГО ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Приведено описание нового оптического метода визуализации формы и деформации шероховатой поверхности. Описан принцип работы и схема установки, позволяющей визуализировать форму и деформацию некоторых физических объектов. Получены экспериментальные результаты, показывающие возможность определения формы различных объемных тел и величины деформации шероховатых поверхностей.

MYO WIN AUNG, B.S. RINKEVICHYUS, I.N. PAVLOV

*National research university "MPEI" (Moscow power engineering institute)*

## **VISUALIZATION OF SHAPE AND DEFORMATION OF ROUGH SURFACE BY STRUCTURED OPTICAL RADIATION**

Description of the novel optical method of shape and deformation of rough surface visualization is given. The principle of operation and scheme of setup allowing to visualize shape and deformation of some physical objects are described. The experimental results showing possibility of determination of shape of different extended bodies and value of deformation of rough surface are received.

Вопрос определения формы объектов остро стоит в областях науки и техники, связанных с машинным зрением. Автоматическое распознавание формы объектов необходимо для образования обратной связи между механизмами и окружающим миром. Одним из простых и удобных способов визуализации формы объекта для его распознавания является регистрация изображения структурированного оптического излучения с необходимым пространственным распределением интенсивности (набор параллельных линий, прямоугольник, крест, матрица точек, набор концентрических колец и т.д.), направляемого на исследуемый объект.

Еще одной важной характеристикой, которую можно получить при использовании структурированного оптического излучения, является величина деформации поверхности объекта от первоначального положения. Для того чтобы определить деформацию, нужно записать два изображения, получаемые при освещении деформированного и

недеформированного объекта структурированным оптическим излучением, а затем обработать их с помощью специального алгоритма.

Для визуализации деформации крупномасштабных твердых тел разработан ряд оптических методов: интерференционный голографический, теневой, теневой фоновый и др. Эти методы малоприспособлены для визуализации мелкомасштабных тел. Авторами предложен и разработан новый оптический метод визуализации и определения формы мелкомасштабных тел. Суть предложенного метода состоит в следующем. Исследуемые объекты зондируются пространственно структурированным оптическим излучением, получаемым с помощью дифракционных оптических элементов. Этот вид излучения широко используется в лазерной рефрактографии [1-3]. На рис. 1 показана схема созданной экспериментальной установки.

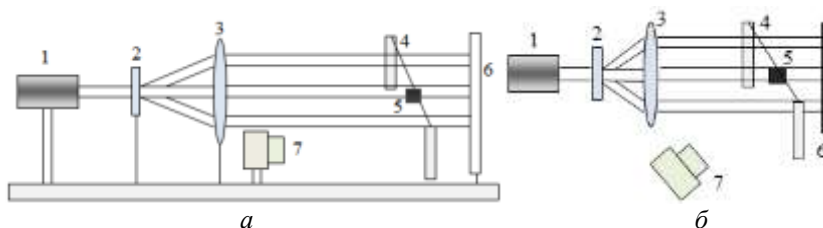


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: вид сбоку (а); вид сверху (б)

Экспериментальная установка, реализующая данный метод, состоит из источника оптического излучения 1, дифракционно-оптического элемента 2, оптической системы 3 для коллимирования и направления структурированного оптического излучения на объект, самого объекта 5, закрепленного на эластичном подвесе 4, экрана 6, а также цифровой фотокамеры 7 и персонального компьютера. Разработана методика визуализации и определения величины изгиба различных тел, форм и деформаций.

#### *Список литературы*

1. Евтихиева О.А., Расковская И.Л., Ринкевичус Б.С. Лазерная рефрактография. М.: Физмаглит, 2008.
2. Evtikhieva O.A., Raskovskaya I.L., Rinkevichyus B.S. Laser refractography. NY: Springer, 2010.
3. Ринкевичус Б.С., Ведяшкина А.В., Павлов И.Н., Расковская И.Л., Толкачев А.В. Визуализация динамических тепловых процессов в прозрачных средах с помощью структурированного лазерного излучения // Научная визуализация. 2016. Т.8. №4. С.50-66.

Д.С. ГОНЧАРОВ, В.В. КРАСНОВ,  
Н.М. ПОНОМАРЕВ, Р.С. СТАРИКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИИ АМПЛИТУДНОГО ЖК ПВМС ДВУХЛУЧЕВЫМ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

Приведены результаты экспериментов по исследованию зависимости фазового сдвига волны, проходящей через амплитудный жидкокристаллический пространственно-временной модулятор света (ПВМС) от величины интенсивности поданного на ПВМС сигнала.

D.S. GONCHAROV, V.V. KRASNOV,  
N.M. PONOMAREV, R.S. STARIKOV

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

## **MEASUREMENT OF PHASE MODULATION OF AMPLITUDE LC SLM BY DUAL-BEAM INTERFEROMETRIC METHOD**

The results of experiments on the measurement of the phase shift of the amplitude liquid crystal spatial light modulator depending on the signal value are presented.

Для амплитудных жидкокристаллических (ЖК) пространственно-временных модуляторов света (ПВМС) помимо модуляции амплитуды также характерна некоторая фазовая модуляция. Она может быть как сравнимой с естественной флуктуацией фазы, обусловленной неабсолютной когерентностью света, так и превышать ее. Целью данной работы было экспериментальное определение величины фазового сдвига в ЖК ПВМС [1] HoloEye LC 2002, а также измерение величины фазового сдвига как функции интенсивности сигнала, поданного на модулятор [2]. Кроме того, были проведены измерения видности как функции интенсивности сигнала, изменения которой могут быть связаны с флуктуациями фазового сдвига в течение кадра [3].

Измерения фазового сдвига проводились двухлучевым интерференционным методом (схема установки представлена на рис. 1). В качестве источника когерентного излучения использовался неодимовый лазер с длиной волны 532 нм. С помощью линзы и коллиматора был получен расходящийся световой пучок равномерной освещенности. Линза

Л2 преобразовала сферическую волну в плоскую, после чего волна попала на экран Н с двумя круглыми отверстиями. В результате, были получены 2 луча с одинаковой интенсивностью, которые попадали на разные области модулятора STLM, при этом лишь на одну из областей модулятора подавался сигнал. На модулятор выводились полутоновые изображения размером 800x600 пикселей. Линза Л3 фокусировала изображение на плоскости Х, а линза Л4 строила увеличенное изображение плоскости Х на камере PixeLink PL-B781F. В результате, на камере была зафиксирована картина интерференции двух лучей. При изменении интенсивности сигнала, поданного на модулятор, положение интерференционных полос на камере менялось, что позволило определить фазовый сдвиг между лучами. Таким образом, были получены изображения интерференционных картин, после чего был определен сдвиг интерференционных полос относительно картины, полученной при поданном на ПВМС нулевом сигнале.

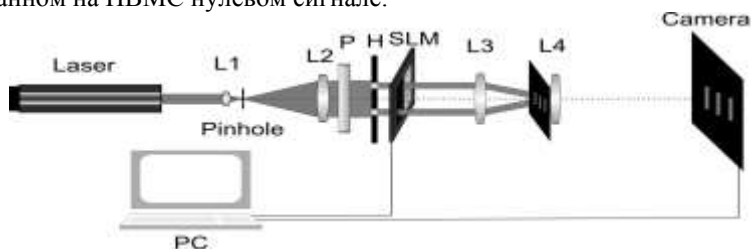


Рис. 1. Схема установки

В результате эксперимента была получена зависимость фазового сдвига от величины поданного на ЖК ПВМС сигнала. Фазовая модуляция значительно превышает естественную флуктуацию фазы, что говорит о важности ее учета при использовании данного ПВМС. Кроме того, было обнаружено значительно снижение видности интерференционных полос (на порядок) при определенных значениях интенсивности, поданной на ПВМС, что связано с флуктуациями фазового сдвига в течение кадра.

#### *Список литературы*

1. Turunen J., Wyrowski F. *Diffractive Optics for Industrial and Commercial Applications*. Berlin: Akademie Verlag, 1998.
2. Bondareva A.P., Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Starikov R.S., Starikov S.N. Measurement of characteristics and phase modulation accuracy increase of LC SLM "HoloEye PLUTO VIS". // *Journal of Physics: Conference Series*. 2014. V.536. P.012011.
3. Lizana A., Moreno I., Márquez A., Iemmi C., Fernández E., Campos J., Yzuel M.J. Time fluctuations of the phase modulation in a liquid crystal on silicon display: characterization and effects in diffractive optics // *Opt. Express*. 2008. V.16. P.16711-16722.

Н.В. БАРЫШНИКОВ, Д.Г. ДЕНИСОВ, В.Е. КАРАСИК,  
А.Б. МОРОЗОВ<sup>1</sup>, В.Е. ПАТРИКЕЕВ<sup>1</sup>, Г.М. СУЛЕЙМАНОВ<sup>1</sup>  
*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*  
<sup>1</sup>*Лыткаринский завод оптического стекла, Московская обл.*

**ВЫСОКОТОЧНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ  
СРЕДНЕКВАДРАТИЧЕСКОГО ОТКЛОНЕНИЯ  
ВОЛНОВОГО ФРОНТА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
ПРИ КОНТРОЛЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ  
НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НАНОМЕТРОВОГО УРОВНЯ  
ПРОФИЛЕЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ**

Рассматривается актуальная научно-техническая проблема в современных оптических технологиях – разработка методики высокоточного контроля поверхностных неоднородностей крупногабаритных лазерных деталей нанометрового уровня. Предложенная методика, позволяет оценить погрешности аппаратуры контрольно-измерительного стенда, алгоритмические составляющие структуры общей погрешности контроля, а так же погрешности изготовления детали в широком спектральном диапазоне пространственных неоднородностей на основе расчёта и анализа одномерной спектральной плотности корреляционной функции (СПКФ1).

N.V. BARYSHNIKOV, D.G. DENISOV, V.E. KARASIK,  
A.B. MOROZOV<sup>1</sup>, V.E. PATRIKEEV<sup>1</sup>, G.M. SULEYMANOV<sup>1</sup>  
*Bauman Moscow State Technical University,*  
<sup>1</sup>*Lytkarino Optical Glass Factory, Moscow region*

**THE PRECISE METHOD FOR MEASURING THE RMS  
OF THE WAVEFRONT OF LASER RADIATION  
AT THE CONTROL SURFACE INHOMOGENEITIES  
OF NANOMETER-LEVEL PROFILES OF OPTICAL DETAILS**

The topical scientific - technical problem in modern optical technologies - development of methods of high-precision control of surface irregularities bulky laser components subnanometer level. The proposed method makes it possible to evaluate the error control equipment - measuring stand, algorithmic components of the overall structure of the control error, as well as parts of manufacturing errors in a wide spectral range of spatial inhomogeneities on the basis of the calculation and analysis of one-dimensional power spectral density (PSD - 1D).

В настоящее время одной из актуальных научно - технических задач в области оптических материалов и технологий современной оптической промышленности является задача создания перспективных крупногабаритных лазерных активных элементов с высокими показателями качества поверхностных неоднородностей изготавливаемых профилей [1-3]. Данный класс изделий применяется в лазерных технологических комплексах с целью получения высоких энергий для реализации термоядерного синтеза. Стоит отметить, что обеспечение высоких эксплуатационных показателей таких изделий достигается как за счёт современных технологических методов формообразования, так и благодаря оперативному межоперационному контролю. Наличие мелкомасштабных неоднородностей, как на поверхности, так и в структуре оптического материала может привести к самофокусировке лазерного излучения и как следствие к разрушению материала при проходе столь мощного лазерного пучка. В этой связи научно-технические задачи, посвящённые аттестационной диагностики неоднородностей материалов и профилей поверхностей лазерных изделий нанометрового уровня являются актуальными, а разработка методик высокоточного контроля при проектировании полноапертурного (до 1 метра) контрольного - измерительного оборудования важным этапом создания комплекса цеховой аппаратуры метрологического обеспечения принципиально нового поколения. Представленная методика аттестации статистических показателей качества исследуемых профилей крупногабаритных лазерных деталей на основе анализа СПКФ1 позволяет оценивать влияние отдельно взятых поверхностных неоднородностей на результирующую погрешность эффективной шероховатости, что обеспечивает высокую чувствительность и точность диагностики высотных параметров профилей нанометрового уровня.

*Список литературы*

1. Campbell J.H., Hawley-Fedder R.A., Stolz C.J., Menapace J.A., Borden M.R., Whitman P.K., Tu J., Riley M.O., Feit M.D., Hackel R.P. NIF Optical Materials and Fabrication Technologies: An Overview // Proc. SPIE. 2004. V.5341. P.84–101.

2. Денисов Д.Г. Разработка методов и аппаратуры лазерного интерференционного контроля формы и качества оптических поверхностей крупногабаритных зеркал на стадиях шлифования. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2010.

3. Денисов Д.Г., Карасик В.Е., Орлов В.М. Измерение параметров микронеровностей крупногабаритных шлифованных поверхностей оптических деталей при помощи лазерной интерферометрии // Метрология. 2009. №9. С.15-24.

Н.Н. ЕВТИХИЕВ, В.В. КРАСНОВ, А.В. ШИФРИНА  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ВИЗУАЛЬНОЙ СКРЫТНОСТИ КОДИРОВАННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ОПТИЧЕСКОГО КОДИРОВАНИЯ**

Предложены методы оценки визуальной скрытности кодированных изображений, полученных в системах оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением, и проведено сравнение их эффективности.

N.N. EVTIKHIEV, V.V. KRASNOV, A.V. SHIFRINA  
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*

## **METHODS OF EVALUATION OF VISUAL CONCEALMENT OF ENCODED IMAGES IN SCHEMAS OF OPTICAL IMAGE ENCRYPTION**

Methods of evaluation of visual concealment of encoded images in schemes of optical image encryption with spatially-incoherent illumination are proposed. Comparison of proposed methods is performed.

Методы оптического кодирования, в том числе с пространственно-некогерентным освещением, активно развиваются в последнее время. Оптические методы обладают такими преимуществами по сравнению с цифровыми как высокие быстродействие и криптостойкость. Для оценки эффективности оптических методов с пространственно-некогерентным освещением и их сравнения, необходимо использовать численный параметр, определяющий степень визуальной скрытности кодированного изображения.

Во-первых, предлагается использовать максимальное значение массива коэффициентов корреляции. Каждая точка  $r[i,j]$  массива получается расчетом корреляции между исходным изображением и равным ему по размеру фрагментом кодированного изображения, отсчитываемого от элемента  $[i,j]$ . Значения  $i$  и  $j$  лежат в диапазоне от 1 до количества отсчетов в ключе кодирования по каждой из сторон соответственно.



Пороговым значением коэффициента корреляции, обеспечивающим высокую визуальную скрытность, принято считать значение 0,1 (при нем в кодированном изображении не остаётся визуальных следов исходного).

Однако данный метод может дать лишь качественную оценку визуальной скрытности, поскольку практически не зависит от главной характеристики ключа кодирования: отношения величины пика Фурье-спектра на нулевой частоте к среднему уровню спектра (ОПС).

Для более точной оценки был разработан второй метод, основанный на попытке восстановить ключ кодирования. Он состоит из трёх этапов:

1. Выделение границ в кодированном и исходном изображениях.

2. Построение восстановленного ключа кодирования – массива значений коэффициента корреляций  $r[i,j]$  между границами кодированного и исходного изображений. Массив рассчитывается аналогично предыдущему методу оценки визуальной скрытности.

3. Расчёт максимального коэффициента корреляции между восстановленным и использованным ключами кодирования.

На рис. 1 представлены результаты сравнения эффективности предложенных методов. Квадратами отмечена зависимость для метода, основанного на расчете коэффициента корреляции между изображениями, точками – между ключами кодирования.

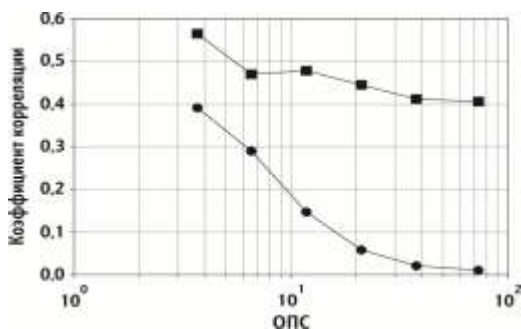


Рис. 1. Зависимость коэффициента корреляции от ОПС ключа кодирования для метода, основанного на расчете корреляции между изображениями (квадраты) и между ключами кодирования (точки)

Показано, что метод, основанный на попытке восстановить ключ кодирования, точнее характеризует рост визуальной скрытности кодированного изображения при использовании ключей с более высокими значениями ОПС.

Н.С. БАЛБЕКИН, М.С. КУЛЯ, А.Т. ТУРОВ, Н.В. ПЕТРОВ  
*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

**ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФУНКЦИИ ПЕРЕНОСА ВОЛНОВОГО  
ФРОНТА ДЛЯ УЧЕТА ДИСПЕРСИИ В ЦИФРОВОЙ  
ИМПУЛЬСНОЙ ТЕРАГЕРЦОВОЙ ГОЛОГРАФИИ  
С РАЗРЕШЕНИЕМ ВО ВРЕМЕНИ**

В работе продемонстрированы модифицированные функции переноса волнового фронта в алгоритмах методов углового спектра и свертки поля с функцией импульсного отклика системы для учета дисперсии в цифровой импульсной терагерцовой голографии с разрешением во времени.

N.S. BALBEKIN, M.S. KULYA, A.T. TUROV, N.V. PETROV  
*ITMO University, Saint-Petersburg*

**WAVEFRONT TRANSFER FUNCTION MODIFICATION  
FOR DISPERSION ACCOUNTING IN THE DIGITAL  
TERAHERTZ PULSED TIME DOMAIN HOLOGRAPHY**

In this work we demonstrate the wavefront transfer functions in angular spectrum and Rayleigh–Sommerfeld convolution algorithms, modified to consider dispersion in digital impulse terahertz time-domain holography.

Импульсная терагерцовая голография с разрешением во времени (ТНз РТДН) [1] представляет собой перспективный метод для работы с фазовыми характеристиками терагерцового (ТГц) поля. Этот подход обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с терагерцовой спектроскопией с разрешением во времени. Данный метод основан на численном решении уравнения распространения волн для каждой из частот ТГц широкополосного диапазона. Одной из проблем при таком подходе является дисперсия среды, присущая многим материалам, так как предложенная ранее авторами математическая модель ее не учитывает.

Для учета дисперсии показателя преломления среды в РТДН требуется модифицировать функцию переноса ТГц поля в алгоритмах методов углового спектра (АС) и свертки поля с функцией импульсного отклика системы (С). Для этого был проведен эксперимент с использованием одночастотного лазера ( $\lambda=532$  нм), кварцевого стекла толщиной  $d = 20$  мм и камерой (КМОП). Схема установки приведена на рис. 1.

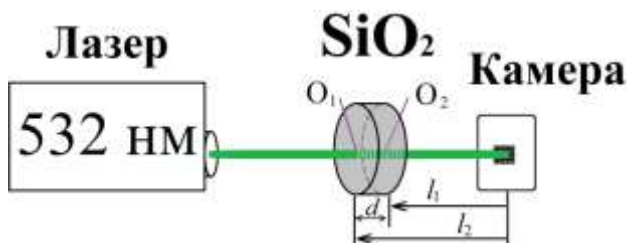


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: Лазер - источник излучения ( $\lambda=532$  нм),  $\text{SiO}_2$  - кварцевое стекло толщиной  $d = 20$  мм,  $O_1$  - объект 1 и  $O_2$  - объект 2, прикрепленные к передней и задней граням стекла соответственно, Камера - матричный приемник (КМОП),  $l_1$  - расстояние от детектора до передней грани стекла (17,5 мм),  $l_2$  - расстояние от детектора до задней грани стекла (38,5 мм)

Для восстановления цифровых голограмм использовался программный пакет, созданный в среде разработки LabView NI. Используемые в программе методы распространения волнового фронта AS и C [2] были преобразованы для учета дисперсии ТГц излучения. Ниже приведены формулы 1 и 2 для методов AS и C соответственно:

$$u(x, y, l) = \iint_{-\infty}^{+\infty} U(f_x, f_y) \exp\left[2\pi i(f_x x + f_y y)\right] * \exp\left[\frac{2\pi i z}{\lambda} \sqrt{1 - (f_x)^2 - (f_y)^2}\right] df_x df_y \quad (1)$$

$$u(x, y, l) = u(x', y', 0) \otimes h(x, y, l). \quad (2)$$

Здесь  $h$  - функция импульсного отклика системы,  $\lambda$  - длина волны,  $l$  - расстояние между объектной плоскостью и плоскостью голограммы.

#### Список литературы

1. Petrov N.V., Kulya M.S., Tsyarkin A.N., Bepalov V.G., Gorodetsky A.A. Application of terahertz pulse time-domain holography for phase imaging. // IEEE transactions on terahertz science and technology. 2016. V.6. No 3. P.464-472.
2. Cheremkhin P.A., Shevkunov I.A., Petrov N.V. Multiple-wavelength Color Digital Holography for Monochromatic Image Reconstruction. // Physics Procedia. 2015. V.73. P.301-307.
3. Balbekin N.S., Kulya M.S., Rogov P.Yu., Petrov N.V. The Modeling Peculiarities of Diffractive Propagation of the Broadband Terahertz Two-dimensional Field. // Physics Procedia. 2015. V.73. P.49-53.

М.Н. КУЛАКОВ, Р.С. СТАРИКОВ, П.А. ЧЕРЁМХИН  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ «COMPRESSED SENSING» В ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ**

Методы на основе «compressed sensing» находят все больше применений в различных областях науки и техники. В работе рассмотрены основные этапы развития «compressed sensing» для задач цифровой голографии. Выявлены дальнейшие перспективы, предложена новая система регистрации.

M.N. KULAKOV, R.S. STARIKOV, P.A. CHEREMKHIN  
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*

## **COMPRESSED SENSING FOR DIGITAL HOLOGRAPHY**

Compressed sensing is widely used in science and technology. The most important stages of development of compressed sensing for digital holography tasks are considered. Further perspectives are described, new registration system is proposed.

Теория «compressed sensing» (compressive sampling; CS) была предложена примерно 10 лет назад [1, 2] и нашла многочисленные возможности применения: томография, кодирование, распознавание лиц, камеры различных спектрального диапазонов и др. Для регистрации изображений объектов обычно используются камеры с числом пикселей от единиц до десятков миллионов. Однако часть информации избыточна в снимках, так как сигналы представимы в разреженном виде с некоторым базисом. Поэтому достаточно регистрировать некоторые проекции сцены для получения изображения объекта с приемлемым качеством.

Через несколько лет CS стали применять в цифровой голографии. Цифровая голография – метод, позволяющий вследствие дифракции излучения на объекте получать информацию о его характеристиках: амплитудно-фазовом профиле, температуре, показателе преломления и др. CS был реализован для цифровых голограмм Габора [3] и Френеля [4] видимого оптического диапазона, голограмм миллиметрового диапазона для записи амплитудной [5] и комплексной составляющих волн [6], голографической видео-томографии [7], повышения глубины резкости на основе осевой голографии [8], существенного ускорения обработки голограмм с использованием графических процессоров [9] и др.

Важным практическим развитием CS стало использование однопиксельных детекторов (ОД) [10]. На отсчеты микрозеркального устройства (DMD, digital micromirror device) выводились различные псевдослучайные наборы значений. Излучение, идущее от объекта, отражалось от поверхности DMD и каждый раз регистрировалось ОД. Количество регистраций составляло несколько сотен или тысяч, что существенно меньше числа элементов разрешения многопиксельных камер. ОД были применены для прямой регистрации излучения, идущего от объектов [10], а затем и цифровой голографической информации: регистрация фазовых объектов в осевой голографии [11, 12], двухшаговая осевая голография [13], оптическая сканирующая голография [14] и др.

К ближайшим перспективам технологий можно отнести увеличение скорости обработки голограмм, уменьшение числа регистраций сигнала ОД. В данной работе предлагается совершенствование системы CS для улучшенного по качеству отображения 3D-сцен, в том числе цветных.

Таким образом, рассмотрены этапы развития «compressed sensing» для задач цифровой голографии. Нестандартные системы, такие как однопиксельная запись, объединили преимущества методов. Проведен анализ, предложена система получения цветных изображений 3D-сцен.

#### *Список литературы*

1. Donoho D.L. Compressed sensing // IEEE Trans. Inf. Theory. 2006. V.52. P.1289-1306.
2. Candès E.J. Compressive sampling // ICM 2006. 2006. V.3. P. 1433-1452.
3. Brady D.J., et al. Compressive holography // Opt. Express. 2009. V.17. P.13040-13049.
4. Rivenson Y., Stern A., Javidi B. Compressive Fresnel holography // IEEE/OSA Journal of Display Technology. 2010. V.6 (10). P.506-509.
5. Cull C.F., Wikner D.A., Mait J.N., Mattheiss M., Brady D.J. Millimeter-wave compressive holography // Applied Optics. 2010. V.49 (19). P.E67-E82.
6. Qiao L., Wang Y., Shen Z., Zhao Z., Chen Z. Compressive sensing for direct millimeter-wave holographic imaging // Applied Optics. 2015. V.54 (11). P.3280-3289.
7. Hahn J., Lim S., Choi K., Horisaki R., Brady D. Video-rate compressive holographic microscopic tomography // Optics Express. 2011. V.19 (8). P.7289-7298.
8. Rivenson Y., Stern A., Javidi B. Improved depth resolution by single-exposure in-line compressive holography // Applied Optics. 2013. V.52 (1). P.A223-A231.
9. Endo Y., et al. GPU-accelerated compressive holography // Opt. Express. 2016. V.24. P.8437.
10. Duarte M.F., et al. Single-pixel imaging via compressive sampling: Building smaller, smaller, and less-expensive digital cameras // IEEE Signal Process. Mag. 2008. V.25. P.83-91.
11. Clemente P., Durán V., Tajahuerce E., et al. Single-pixel digital ghost holography // Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics. 2012. V.86 (4). P.041803.
12. Clemente P., Durán V., Tajahuerce E., Andrés P., Climent V., Lancis J. Compressive holography with a single-pixel detector // Optics Letters. 2013. V.38 (14). P.2524-2527.
13. Li J., Li Y., Wang Y., et al. Two-step holographic imaging method based on single-pixel compressive imaging // Journal of the Optical Society of Korea. 2014. V.18 (2). P.146-150.
14. A-qian S., Ding-fu Z., Sheng Y., et al. Optical scanning holography based on compressive sensing using a digital micro-mirror device // Optics Communications. 2017. V.385. P.19-24.

Ю.Х. ИСМАНОВ, Д.А. ИСМАИЛОВ,  
К.М. ЖУМАЛИЕВ, С.А. АЛЫМКУЛОВ

*Институт физико-технических проблем НАН Кыргызской Республики, Бишкек*

## **ЭФФЕКТ САМОРЕПРОДУЦИРОВАНИЯ В ГОЛОГРАФИИ**

В докладе рассмотрен эффект саморепродуцирования, возникающий при восстановлении голограммы регулярного объекта. Приведены результаты расчета координат плоскостей саморепродуцирования для всех трех дифракционных порядков восстанавливаемой голограммы.

Yu.H. ISMANOV, D.A. ISMAILOV,  
K.M. ZHUMALIEV, S.A. ALYMKULOV

*Institute of Physical-Technical Problems and Material Science of NAS KR, Bishkek,  
Kyrgyz republic*

## **SELF-REPRODUCTION EFFECT IN HOLOGRAPHY**

The effect of self-reproduction in holography is considered in the report. The results of calculation of self-reproduction plane coordinates for all three diffraction orders of the restored hologram are given.

Голограмма регулярного объекта, подобного линейной одномерной решетке с периодом  $d$ , имеет ряд особенностей, отличающих ее от голограмм других объектов [1]. При восстановлении такой голограммы исходной опорной волной длиной  $\lambda$  можно наблюдать эффект саморепродуцирования решетки в его голографическом проявлении [2, 3].

Если осветить данную голограмму опорной волной, которая использовалась при записи, то она восстанавливает за голограммой три луча, представляющих собой дифракционные порядки, направление которых определяется значением угла между лучами распространения опорной и объектной волн.

В -1-ом порядке дифракции восстанавливается изображение решетки, являющееся действительным.

Однако, кроме обычного действительного изображения решетки, которое восстанавливается там, где и необходимо восстанавливаться действительному изображению при использовании внеосевой схемы записи голограммы, происходит восстановление всей последовательности саморепродукций решетки, которая простирается не только в области

действительного пространства, но и в пространство перед голограммой, т. е. в мнимое пространство.

В +1-ом порядке дифракции восстанавливается мнимое изображение записанной решетки. Последовательность саморепродукций и в этом случае простирается из мнимой области пространства в действительную.

В нулевом порядке дифракции, мы можем наблюдать, по сути, то, что происходит при восстановлении голограммы Габора.

В данном случае также, кроме обычных изображений решетки – действительного и мнимого, восстанавливаются последовательности их саморепродукций.

Координаты плоскостей саморепродукций для различных порядков дифракции определяются следующими значениями:

для +1-го порядка дифракции.

$$z_1 = -z_r + \frac{2d^2}{\lambda} k, \quad \text{где } k = l, l = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad z_r - \text{ координата}$$

плоскости голограммы; для -1-го порядка дифракции

$$z_1 = \frac{2d^2}{\lambda} n + \left[ z_r - \text{int}\left(\frac{z_r}{t}\right)t \right], \quad \text{где } t = \frac{2d^2}{\lambda} - \text{ постоянная}$$

саморепродуцирования,  $n = l/2$ , ( $l = 0, 1, 2, 3, \dots$ ). Для координат, задающих положения плоскостей саморепродукции в нулевом порядке дифракции, получается соотношение, совпадающее с координатами в -1-м порядке дифракции:

$$z_1 = \frac{2d^2}{\lambda} n + \left[ z_r - \text{int}\left(\frac{z_r}{t}\right)t \right].$$

#### *Список литературы*

1. Исманов Ю.Х., Исмаилов Д.А., Алымкулов С.А. Моделирование в голографии с использованием второго опорного пучка // Academy. 2016. № 6(9). С.10-13.
2. Исманов Ю.Х., Исмаилов Д.А., Алымкулов С.А. Формирование последовательности саморепродукций одномерной линейной решеткой // Academy. 2016. № 6(9). С.6-10.
3. Исманов Ю.Х., Исмаилов Д.А., Алымкулов С.А. Саморепродуцирование регулярных объектов с ограниченной апертурой // Наука, новые технологии и инновации. 2015. №7. С.3-5.

Е.А. КУРБАТОВА, П.А. ЧЕРЁМХИН

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **МЕТОДЫ СЖАТИЯ ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ С ПОМОЩЬЮ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЙ**

В работе рассмотрены методы сжатия цифровых голограмм, основанные на интегральных преобразованиях. Получены результаты квантования файлов голограмм с использованием семи вейвлетов.

E.A. KURBATOVA, P.A. CHEREMKHIN

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

## **METHODS OF COMPRESSION OF DIGITAL HOLOGRAMS BY WAVELET TRANSFORMS**

The paper deals with digital holograms compression methods based on integral transforms. Results of holograms quantization using 7 different wavelets are obtained.

Для повышения скорости передачи голограмм и снижения объёмов архивной памяти, требуемой для их хранения, можно проводить сжатие голограмм. В настоящее время существуют различные типы методов сжатия цифровых голограмм [1, 2], в том числе, основанные на преобразованиях (косинусном, вейвлетном и др. [3, 4]). Сжатие на основе вейвлетов заключается в разложении исходного фотоизображения на массивы аппроксимирующих коэффициентов и связанных с ними коэффициентов детализации. За счет данных коэффициентов учитываются зависимости между интенсивностями в соседних пикселях. Данный подход ориентирован на обработку изображений с гладкими и квазигладкими переходами яркости, т.к. плавные переходы можно описать малым количеством коэффициентов, что обеспечивает высокие степени сжатия с минимальными потерями качества или даже без потери качества. Массив, содержащий низкочастотные компоненты изображения как по строкам, так и по столбцам, при разложении на следующий уровень вейвлета, рассматривается как исходный и делится аналогично.

Для задач сжатия голограмм реализованы семь методов на основе различных вейвлет-преобразований [5-7], в частности вейвлетов Хаара, Добеши, Мейера, биортогональных и обратно биортогональных вейвлетов, а также коифлетов и симлетов. На рис. 1 представлены цифровые голограммы, сжатые с помощью реализованных вейвлетов



различных уровней. Вейвлет-коэффициенты этих голограмм были далее дополнительно сжаты с помощью итеративного метода квантования.

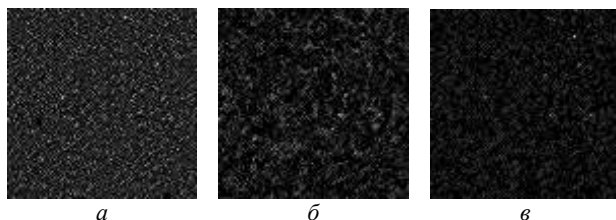


Рис. 1. Цифровые голограммы, сжатые вейвлетами Хаара (а, в) и биортогональным (б) 3 (а, б) и 50 уровней (в) и далее итеративным методом до 8 градаций яркости

При использовании вейвлет-преобразования высоких уровней в случае малого числа уровней квантования коэффициенты преобразования вырождаются в нулевые значения. При повышении количества уровней квантования (особенно с 2 до 6÷8) качество восстановления изображений значительно улучшается по сравнению с малым числом градаций.

Таким образом, реализованы и применены различные вейвлеты для сжатия цифровых голограмм. Получено, что наилучшее качество восстановления, например, при малом числе уровней разложения демонстрируют вейвлеты Хаара, Добеши и коифлеты. В зависимости от требуемого качества восстановления изображений и числа градаций голограммы, можно отобрать подходящие вейвлет-методы сжатия.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), грант № 16-07-00389.

#### *Список литературы*

1. Gonzalez R.C., Woods R.E., Eddins S.L. Digital Image Processing Using MATLAB, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2004.
2. Kurbatova E.A., Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Starikov S.N. Methods of Compression of Digital Holograms // Physics Procedia. 2015. V.73. P.328-332.
3. Hou X., et al. Complex SAR Image Compression Based on Directional Lifting Wavelet Transform With High Clustering Capability // IEEE Trans.Geosci.Remote Sens. 2013.V.51. P.527.
4. Saxena A., Fernandes F.C. DCT/DST-based transform coding for intra prediction in image/video coding // IEEE Transactions on Image Processing. 2013. V.22. P.3974-3981.
5. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов // М.: ДМК Пресс, 2005.
6. Mallat S.A. Wavelet Tour of Signal Processing // Elsevier, 2009.
7. Kurbatova E.A., Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N. Methods of compression of digital holograms, based on 1-level wavelet transform // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V.737. P.012071.

С.С. КАТЕРОВА, В.В. КРАСНОВ, Е.А. КУРБАТОВА,  
Д.Ю. МОЛОДЦОВ, П.А. ЧЕРЁМХИН, В.Г. РОДИН  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДА СЖАТИЯ ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИФФУЗИИ ОШИБКИ**

В работе рассмотрены особенности применения метода диффузии ошибки для сжатия цифровых и компьютерных голограмм. Разработаны и реализованы модификации метода, а также апробированы на файлах голограмм.

S.S. KATEROVA, V.V. KRASNOV, E.A. KURBATOVA,  
D.Yu. MOLODTSOV, P.A. CHEREMKHIN, V.G. RODIN  
*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)*

## **DEVELOPMENT OF DIGITAL HOLOGRAMS COMPRESSION METHODS USING ERROR DIFFUSION**

The features of the error diffusion method for digital and computer holograms compression are discussed. Modifications of the method were developed, implemented and tested on files of holograms.

Развитие технологий цифровой голографии позволило передавать по каналам связи информацию о 2D и 3D-сценах. Для хранения цифровых голограмм и голографического видео требуются носители информации с большой ёмкостью. Для снижения размера файла голограммы используют методы сжатия: скалярного, векторного типов [1-3], на основе вейвлетов и др. [4-6]. В работе предложено использовать процедуру диффузии ошибки (ДО) для создания нового метода сжатия голограмм.

Метод диффузии ошибки – популярный метод бинаризации. Он был первоначально разработан для того, чтобы отобразить изображения на выходных устройствах: мониторах, принтерах и т.п. [7]. Позже метод стал применяться и в голографии [8-10], в т.ч. для уменьшения ошибок при восстановлении изображений с синтезируемых бинарных голограмм. Метод работает последовательно, то есть данные обрабатываются линия за линией, пиксель за пикселем. Общий принцип работы метода может быть описан следующим образом: значение яркости каждого пикселя полутоновой голограммы сравнивается с выбранным порогом. Если

яркость больше порога, то пикселю присваивается значение 1, в противном случае - 0. Ошибка, вызванная этой операцией, применяется к необработанным пикселям, которым задают новое значение яркости.

Метод диффузии ошибки позволяет получить высокое качество восстанавливаемых полутоновых изображений. Недостатки метода – низкая дифракционная эффективность и наличие области шумов. Итеративные методы обладают лучшим шумоподавлением, но более ресурсоемки, а по качеству восстановления полутоновых изображений уступают методу диффузии ошибки. Из-за гибкости подбора параметров можно повысить продуктивность метода диффузии ошибки.

Были реализованы различные модификации метода, осуществляющие:

- бинарное пороговое сжатие голограммы с использованием процедуры диффузии ошибки;
- бинарное итеративное сжатие голограммы с использованием процедуры диффузии ошибки;
- многоградационное сжатие голограммы с использованием процедуры диффузии ошибки.

Реализованные и разработанные модификации метода диффузии ошибки были апробированы с использованием численно синтезированных и зарегистрированных цифровых голограмм.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), грант № 16-07-00389.

#### *Список литературы*

1. Kurbatova E.A., Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Starikov S.N. Methods of Compression of Digital Holograms // Physics Procedia. 2015. V.73. P.328-332.
2. Alfalou A., Brosseau C. Recent Advances in Optical Image Processing // Progress in Optics. 2015. V.60. P.119-262.
3. Cheremkhin P.A., Kurbatova E.A. Numerical comparison of scalar and vector methods of digital hologram compression // Proceedings of SPIE. 2016. V.10022. P.1002227.
4. Mallat S.A. Wavelet Tour of Signal Processing. Elsevier, 2009.
5. Tsang P.W.M., Poon T.-C., Liu J.-P., Kim T., Kim Y.S. Low Complexity Compression and Speed Enhancement for Optical Scanning Holography // Scientific Reports. 2016. V.6. P.34724
6. Kurbatova E.A., Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N. Methods of compression of digital holograms, based on 1-level wavelet transform // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V.737. P.012071.
7. Robert W.F., Steinberg L. Adaptive algorithm for spatial greyscale // Proc Soc Inf Disp. 1976. V.17 (2). P.75-77.
8. Weissbach S., Wyrowski F., Bryngdahl O. Digital phase holograms: Coding and quantization with an error diffusion concept // Optics Communications. 1989. V.72 (1-2). P.37-41.
9. Tsang P.W.M., et al. Fast conversion of digital Fresnel hologram to phase-only hologram based on localized error diffusion and redistribution // Opt. Express. 2014. V.22 (5). P.5060-5066.
10. Matsumoto Y., Takaki Y. Improvement of gray-scale representation of horizontally scanning holographic display using error diffusion // Opt. Lett. 2014. V.39 (12). P.3433-3436.

Т.А. ВОВК, Н.В. ПЕТРОВ  
*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОГО ФАЗОВОГО СОПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ**

В данном сообщении мы предлагаем исследование применимости и оценку эффективности метода цифрового оптического фазового сопряжения (ЦОФС) для задачи формирования оптических волновых полей. Метод ЦОФС использует численное распространение волнового фронта от желаемых объектов для получения необходимых фазовых распределений в плоскости регистрации. В связи с простотой метода ЦОФС этот подход полезен для быстрого формирования первого приближения к трехмерному голографическому изображению.

Т.А. VOVK, N.V. PETROV  
*ITMO University, Saint-Petersburg*

## **APPLICATION OF DIGITAL PHASE CONJUGATION IN THE PROBLEM OF OPTICAL WAVE FIELD FORMATION**

In this report, we propose to investigate the applicability and efficiency digital optical phase conjugation (DOPC) method for the task of the optical wave field formation. DOPC method uses the numerical propagation of the wavefront from the desired object (in the simplest case, point source) to get the required phase distribution in the registration plane. Due to the simplicity of the DOPC method, this approach is useful for the fast basic 3D holographic image formation.

Проблема трехмерного голографического имаджинга актуальна в связи с быстрым развитием цифровых технологий и методов визуализации данных. Создание методов формирования оптических полей для записи трехмерных голографических изображений с высокой скоростью расчетов необходимо из-за низкой вычислительной эффективности существующих подходов цифровой трехмерной голографии, в том числе точечного суммирования и табличного преобразования [1].

В данной работе предлагается исследование метода цифрового оптического фазового сопряжения (ЦОФС) [2], оценку его применимости и эффективности для задачи создания трехмерного голографического изображения. Метод ЦОФС (рис. 1) использует численное

распространение волнового фронта от желаемых объектов (в простейшем случае от точечных источников  $I_i(x,y)$ ), чтобы получить необходимые фазовые распределения в плоскости регистрации  $\varphi_i(x,y)$ . Для получения изображения  $I(x,y)$  совокупности нескольких простых объектов, составляющих ансамбль, фазовые распределения  $\varphi_i(x,y)$  случайным образом перепутываются ( $\varphi_{\Sigma}(x,y)$ ).

Для распространения волнового фронта применяется метод углового спектра плоских волн (УС), поскольку он является точным для расстояний, предусмотренных в численном моделировании. Проверяются основные свойства метода ЦОФС для случая трехмерной фигуры, составленной из точечных излучателей. Исследуется зависимость фазовых распределений элементарных облучателей от метода, используемого для формирования их изображения. Благодаря простоте метода ЦОФС рассматриваемый подход полезен для быстрого формирования первого приближения к трехмерному голографическому изображению. Численное моделирование проводится с помощью среды программирования National Instruments LabVIEW 8.5.

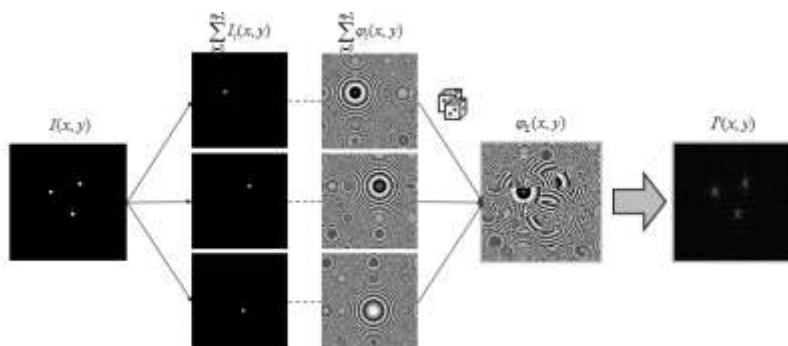


Рис. 1. Условная схема работы цифрового оптического фазового сопряжения

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01). Т.А. Вовк благодарит за поддержку Комитет по Науке и Высшей Школе Правительства Санкт-Петербурга.

#### Список литературы

1. Lucente M.E. // Journal of Electronic Imaging. 1993. V.2. No 1. P.28-34.
2. Cui M., Yang C. // Optics express. 2010. V.18. No 4. P.3444-3455.

Е.Д. МИНАЕВА, В.В. КРАСНОВ, П.А. ЧЕРЁМХИН, В.Г. РОДИН  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ПРЯМОГО ПОИСКА СО СЛУЧАЙНОЙ ТРАЕКТОРИЕЙ ДЛЯ ЗАДАЧИ МИНИМАЛИЗАЦИИ ОШИБКИ СИНТЕЗА КИНОФОРМОВ**

Проведен анализ эффективности применения метода прямого поиска со случайной траекторией для задачи минимизации ошибки синтеза киноформов в сочетании со следующими методами синтеза киноформов: Герчберга-Сэкстона, Герчберга-Сэкстона с весовыми коэффициентами, адаптивно-аддитивный и Финапа. По результатам численных экспериментов все методы дают близкие результаты, значение нормированного среднеквадратичного отклонения реконструированных изображений от исходных снижается в среднем на 24%.

E.D. MINAEVA, V.V. KRASNOV, P.A. CHEREMKHIN, V.G. RODIN  
*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)*

## **ANALYSIS OF EFFICIENCY OF DIRECT SEARCH WITH RANDOM TRAJECTORY METHOD APPLIED TO THE TASK OF KINOFORM SYNTHESIS ERROR MINIMIZATION**

Analysis of efficiency of direct search with random trajectory (DSRT) method applied to the task of kinoform synthesis error minimization is conducted. DSRT method was used in conjunction with following methods: Gerchberg-Saxton, Gerchberg-Saxton with weight coefficients, adaptive-additive and Fienup. Results of numerical experiments demonstrate close results among tested methods, average reduction of synthesis error equals to 24%.

Синтез дифракционных оптических элементов является одной из важных задач компьютерной оптики. Дифракционные оптические элементы широко используются в различных областях науки и техники. Киноформ – синтезируемый фазовый дифракционный оптический элемент, который позволяет восстановить изображение, освещая его плоской волной. Киноформы формируют только один порядок дифракции, который содержит восстановленное изображение.

Метод прямого поиска со случайной траекторией (ППСТ) может быть использован для получения киноформов с малой ошибкой синтеза. Данный метод может работать с любым начальным распределением фазы,

однако, результат получается лучше, если в качестве начального распределения использовать киноформ, полученный другим методом. Для этой цели были использованы следующие методы синтеза киноформов: Герчберта-Сэкстона (ГС) [1], Герчберта-Сэкстона с весовыми коэффициентами (ГСВК) [2], адаптивно-аддитивный (АА) [3] и Финапа (Ф) [4]. После первоначального синтеза киноформа создается случайная карта обхода матрицы значений киноформа. Далее, в соответствии с картой обхода, значения элементов киноформа поочередно изменяются таким образом, чтобы минимизировать отклонение реконструированного изображения от исходного.

Оценка качества реконструированных изображений производилась путём расчёта нормированного среднеквадратичного отклонения (НСКО) реконструированных изображений от оригинальных.

На рис. 1 представлены экспериментальные результаты для 10 типичных полутоновых изображений полученные для четырех оригинальных методов и в комбинации с ППСТ.

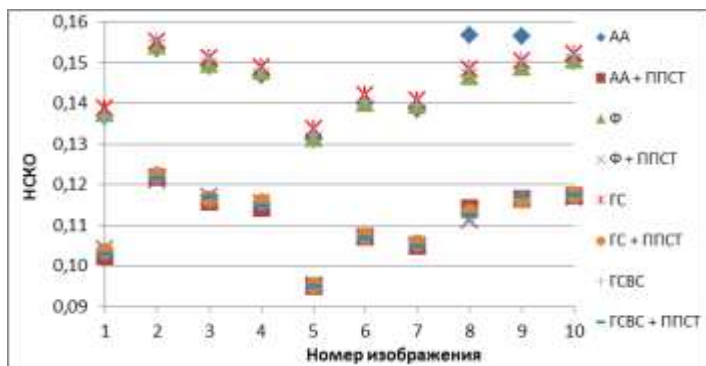


Рис. 1. НСКО реконструированных изображений для киноформов, синтезированных четырьмя оригинальными методами и в комбинации с ППСТ

Для протестированных методов результаты НСКО несколько отличаются, но в среднем примерно одинаковы. Среднее значение снижения НСКО после применения метода ППСТ составляет  $(23,8 \pm 0,3)\%$ .

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-37-00343.

#### Список литературы

1. Gerchberg R.W., Saxton W.O. // *Optik*. 1972. V.35. P.237.
2. Kuzmenko A.V. // *Opt. Lett.* 2008. V.33. P.1147.
3. Дифракционная компьютерная оптика. М.:Ф№, 2007.
4. Fienup J.R. // *Appl. Opt.* 2013. V.52. P.45.

## ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

### -А-

Абдуллаев С.Д. 54  
Авербух Б.Б. 464  
Авербух И.Б. 464  
Аверин С.В. 245, 382  
Аверченко А.В. 102  
Авласевич Н.Т. 622  
Адамов Г.Е. 66  
Айдинян Н.В. 336  
Айзикович А.А. 223  
Акимов А.А. 177  
Акимов А.В. 74  
Акимова Я.Е. 348, 568  
Акмалов А.Э. 498  
Акованцева А.А. 502  
Аксенов Е.Т. 454  
Аксенова К.А. 284  
Алексеев А.М. 424, 426  
Алексеев К.Н. 82, 562, 566  
Алиев С.А. 78  
Алыкова О.М. 504  
Алымкулов С.А. 646  
Амброзевич С.А. 114, 116  
Ананьев П.С. 334  
Ангервакс А.Е. 284  
Андреев А.Л. 34  
Андреева Н.В. 432, 458  
Андреева О.В. 432, 458  
Андреева Т.Б. 34  
Андрианова А.В. 100  
Анохина М.А. 578  
Антонов С.Н. 88  
Анцыгин В.Д. 60  
Аракелян С.М. 161  
Арестов С.И. 38  
Артёмьев Д.Н. 544, 550  
Артюков И.А. 231, 251  
Асадова А.А. 542, 546  
Асадуллина А.Р. 396  
Асалханова М.А. 288  
Асташкевич С.А. 472  
Аунг М.В. 634  
Ашуров М.С. 290

### -Б-

Бабкина А.Н. 444  
Баграташвили В.Н. 132  
Баззал Х. 510  
Бакунов М.И. 40  
Балаклеийский Н.С. 146  
Балакший В.И. 86  
Балбекин Н.С. 642  
Балмасов А.В. 552  
Баранов А.Н. 420  
Барачевский В.А. 158  
Бардакова К.Н. 526  
Баршак Е.В. 562  
Барышников Н.В. 215, 638  
Бахвалова Т.Н. 173  
Безниско Е.И. 504  
Безпальный А.Д. 572  
Безрученко В.С. 62, 388  
Белашов А.В. 268  
Белкин М.Е. 96  
Белов П.А. 26  
Белогорлов А.А. 122  
Белухина Ю.Ю. 522  
Белых В.В. 223  
Белько Н.В. 76  
Беспалов В.Г. 181, 534  
Бикбаев Р.Г. 52, 300  
Бирюков А.С. 187  
Бланк А.В. 255  
Богачков И.В. 136, 362, 368, 370, 372  
Боженко М.В. 392  
Бойченко А.П. 422  
Болдырев К.Н. 108, 120, 328, 436  
Бородако К.А. 138  
Бородин Ю.П. 261  
Борщев О.В. 106  
Братченко И.А. 544, 550  
Брюханов В.В. 80, 185, 410, 430, 452  
Бугай А.Н. 470  
Бурдуковский В.Ф. 526  
Буренков Е.С. 542  
Бусаров А.С. 231  
Бусурич В.И. 219, 243



Буть А.И. 622, 630  
Буфетов И.А. 187  
Бухарин М.А. 118  
Бушмакин В.С. 74  
Быковский А.Ю. 237  
Былина М.С. 183  
Бычков А.Б. 72, 468  
Бышевский-Конопко О.А. 608

**-В-**

Вайчас А.А. 538  
Валитова А.Ф. 250  
Ванин А.И. 140  
Вартапетов С.К. 118, 500  
Васильев Р.Б. 390, 394, 398  
Васильцов В.В. 205  
Ведяшкина А.В. 217, 229  
Вейко В.П. 478  
Векшин М.М. 570, 574  
Величко Е.Н. 454, 456  
Вергелес С.С. 193  
Вереникина Н.М. 247  
Верещагин А.К. 520  
Верхотуров А.О. 308  
Веселов В.О. 576  
Викулин Д.В. 82  
Виноградов А.В. 231  
Виноградова И.Л. 100  
Витухновский А.Г. 114, 116, 130, 390,  
394, 398

Вовк Т.А. 652  
Войцеховский А.В. 378, 380  
Волков В.Г. 596, 602  
Волкова О.И. 420  
Волова Л.Т. 546, 548, 552, 554  
Волостников В.Г. 156, 606  
Волошинов В.Б. 84  
Ворзобова Н.Д. 576  
Воронцов Е.Н. 594  
Воропай Е.С. 510  
Вьюнышев А.М. 52, 300

**-Г-**

Гаврушко В.В. 142  
Гадомский О.Н. 580  
Газизов И.М. 518  
Гайтко О.М. 416  
Галуцкий В.В. 42, 316  
Галушкин М.Г. 205, 494, 530

Ганин Д.В. 500  
Ганжерли Н.М. 386  
Гартман А.Д. 124  
Герасимов В.В. 44  
Гибин И.С. 235  
Гладуш М.Г. 171  
Гладышев А.В. 187  
Гладышев И.В. 173  
Глущенко Л.А. 221  
Головань Л.А. 406  
Гончаров Д.С. 618, 636  
Гончаров С.А. 484, 486  
Гончарова П.С. 32  
Горбьяк В.В. 448  
Горелик В.С. 290  
Горишний В.А. 556  
Городецкий А.А. 560  
Горшков А.В. 418  
Горяев М.А. 68  
Горячев Л.В. 592  
Гребенников Е.П. 66  
Григорьянц А.Г. 532  
Губин М.Ю. 171  
Гулис И.М. 610  
Гуляев С.Н. 386  
Гурылев О.А. 289  
Гусаков Г.А. 76  
Гусейнов А.Ю. 626

**-Д-**

Давлетов Э.Т. 74  
Давыдкин И.Л. 544  
Дайнеко С.В. 58  
Данилов В.А. 360  
Данилов П.А. 376  
Дворецкий Д.А. 480  
Денисов Д.Г. 215, 620, 624, 638  
Денисов Л.К. 480  
Дёмин В.В. 616  
Джумамуратова А.А. 624  
Дзедолик И.В. 556  
Дзядух С.М. 378, 380  
Дмитриева К.А. 138  
Дмитриева М.Д. 424  
Добрецова Е.А. 108  
Добринина Д.А. 478  
Довженко Д.С. 122, 296, 334  
Долгушкин Д.А. 546, 548, 552  
Дубынин С.Е. 261

Дубровин В.Д. 442  
Дудкина Т.Д. 416  
Дудова Д.С. 132, 526  
Дураев В.П. 195  
Дьяконов Е.А. 84, 344  
Дьяченко А.А. 278  
Дьячков В.В. 219  
Дьячков Р.Г. 494  
Дю В.Г. 322, 332  
Дюбо Д.Б. 456

**-Е-**

Евдокимов А.А. 225  
Евлашин С.А. 124  
Евтихийев Н.Н. 253, 640  
Егоров А.Н. 150  
Егоров Ф.А. 189  
Егоров Ю.А. 348  
Егорышева А.В. 416  
Емельянов В.М. 604  
Ефимова А.И. 406  
Ефимова К.В. 594  
Ефременко В.Г. 32

**-Ж-**

Жердев А.Ю. 280  
Житов В.А. 382  
Жумалиев К.М. 646

**-З-**

Заботнов С.В. 406  
Заклдаев Р.А. 506, 508  
Забогин А.П. 510  
Зарубина Е.Г. 542  
Захаров В.П. 544, 550, 626  
Захаров Л.Ю. 382  
Зачиняев Ю.В. 104  
Звагельский Р.Д. 130  
Зверев Г.М. 209  
Звержховский В.Д. 225  
Зворыкин В.Д. 484, 486  
Землякова Е.С. 452  
Землянов М.М. 209  
Земсков К.И. 128  
Зиновьев А.П. 272  
Злоказов Е.Ю. 98, 274, 358  
Золотовский И.О. 564  
Зотов А.М. 102  
Зюбин А.Ю. 430

**-И-**

Ибрагимов А.Э. 568  
Иванов А.А. 138  
Иванов А.В. 54  
Иванов А.Д. 213  
Иванов В.И. 384, 404  
Иванов П.А. 354, 364  
Иванов П.А. 241  
Иванов С.А. 438, 442  
Иванов С.И. 92  
Иванова А.И. 324  
Иванова Г.Д. 404, 412  
Иванова С.В. 330  
Ивахник В.В. 177, 179  
Ивантьев А.И. 70  
Ильина Е.А. 338  
Инюшов А.В. 302  
Ионин А.А. 492  
Ионов А.С. 142  
Иртуганов Н.Н. 251  
Исаев А.А. 390  
Исмагилов А.О. 432  
Исмаилов Д.А. 646  
Исмаилов И.А. 350  
Исманов Ю.Х. 646  
Истратов А.В. 161  
Итяксов Ю.Д. 542

**-К-**

Кадриев О.Р. 142  
Казанцева Е.В. 169  
Каленков Г.С. 266  
Каленков С.Г. 266  
Каменев Д.В. 616  
Каменев О.Т. 590  
Каплунов И.А. 44, 326, 336, 518  
Капранов В.В. 255  
Карасик В.Е. 215, 480, 638  
Карпов В.М. 54  
Карпова О.В. 128  
Карцев П.Ф. 466  
Катерова С.С. 650  
Катковник В.Я. 264  
Кившарь Ю.С. 26  
Кийко В.В. 158  
Киле Е.О. 306, 320  
Киняевский И.О. 492  
Киреева Н.М. 32  
Кирюшина С.И. 412, 460

Киселев В.А. 266  
Кислов Д.А. 400, 408  
Кистенева М.Г. 322, 332  
Кишкин С.А. 606  
Климачев Ю.М. 492  
Клименко С.В. 266  
Климонский С.О. 290  
Клюшник Д.А. 96  
Князь В.А. 243  
Кобранова А.А. 450  
Ковалев М.С. 247, 274  
Ковалева А.О. 340, 352, 566, 614  
Коваленко С.А. 598  
Коваль В.В. 506, 508  
Кожина А.С. 72, 468  
Кожокару И.С. 74  
Козлов А.А. 54  
Козлов А.Ю. 492  
Козлов Д.А. 203  
Козлов С.А. 167  
Козлов С.В. 550  
Козлова А.С. 616  
Козлова Д.А. 438  
Козловский К.И. 199, 496, 498, 512  
Колесников А.И. 44, 336  
Колоколов И.В. 193  
Колосова Е.С. 247  
Колчин А.В. 406  
Колчинский В.А. 590  
Копымагин Д.А. 130  
Колючкин В.В. 632  
Колядин А.Н. 187  
Комиссар Д.А. 398  
Комоцкий В.А. 233, 586  
Компанец О.Е. 368  
Компанец И.Н. 34  
Конеев Р.В. 474  
Константинова Е.И. 80, 410  
Коншина Е.А. 110  
Копенкин С.С. 261  
Кораблев Е.М. 608  
Коркишко Ю.Н. 342  
Корниенко Т.А. 332  
Коробков В.В. 219  
Коробков К.А. 243  
Короленко П.В. 102  
Короннов А.А. 209  
Коршунов В.М. 114, 390  
Корюкин А.В. 50, 298  
Косолапов А.Ф. 187  
Костина Г.В. 462  
Кострицкий С.М. 342  
Котков А.А. 492  
Котковский Г.Е. 496, 498  
Котликов Е.Н. 428  
Котляр В.В. 203  
Котлов В.М. 245, 382  
Котова С.П. 594, 606  
Кочетков П.В. 446  
Крайский А.А. 56, 292  
Крайский А.В. 56, 282, 292  
Краковский В.А. 48  
Красин Г.К. 274  
Краснов В.В. 249, 358, 636, 640, 650,  
654  
Краснова Е.В. 215  
Краснок А.Е. 26  
Краюшкин М.М. 158  
Кретушев А.В. 225  
Криштоп В.В. 32, 312, 462  
Кролевец О.С. 482  
Крыкова В.А. 442  
Крымский М.И. 524  
Крюкова И.С. 296  
Кубликова Д.Н. 74  
Куделин И.С. 480  
Кудрявцева А.Д. 128  
Кудряшов С.И. 376  
Кузнецов И.О. 466  
Кузнецов П.А. 257  
Кузнецов П.И. 382  
Кузора В.Ф. 316  
Кузьмин Н.Н. 105  
Кузьмина Т.Б. 458  
Кузьмина Т.П. 544  
Кузяков Б.А. 354, 364  
Кулаков М.Н. 644  
Кулешов Ю.В. 38  
Кульчин Ю.Н. 288  
Кульчицкий Н.А. 378, 380  
Куля М.С. 181, 560, 642  
Купреев А.Г. 610  
Купрейчик М.И. 86  
Курамшин К.В. 504  
Курбатова Е.А. 648, 650  
Курочкин Н.С. 398  
Курочкина М.А. 110  
Кутровская С.В. 161

Кучеренко М.Г. 408, 414, 418  
Кучерик А.О. 161  
Кушвара Д.А. 514

**-Л-**

Лавров А.П. 92  
Лазарев В.А. 197  
Лазарева Е.П. 394  
Лапаева С.Н. 350  
Лалин В.А. 564  
Лалшин К.Э. 500  
Ларичев А.В. 624  
Ласткин В.А. 142  
Лебедев В.В. 193  
Лебедева Е.В. 478  
Левцкий М.Е. 482  
Лентовский В.В. 602  
Ливашвили А.И. 32, 462  
Лин Й.-Ч. 268  
Лисовский М.И. 199  
Литвинова М.Н. 32, 312  
Литовко Е.П. 376  
Лиховодова Т.Б. 462  
Логачев П.А. 144  
Лосевский Н.Н. 594  
Лощенов В.Б. 536, 540  
Луговской А.В. 608  
Лучников И.А. 74  
Лушников Д.С. 280  
Лыкина А.А. 544  
Любимов А.И. 522, 528  
Ляликов А.М. 622, 630  
Ляхова М.Б. 336  
Ляшко Е.И. 163, 175

**-М-**

Маврицкий О.Б. 150  
Майдыковский А.И. 46, 124  
Маймистов А.И. 163, 175  
Макаревич А.В. 286  
Макаров В.А. 165, 558  
Макаров В.И. 536  
Макаров С.В. 26  
Макин В.С. 221, 476, 488  
Макин Р.С. 476, 488  
Маклыгина Ю.С. 540  
Максименко В.А. 32  
Максимова Л.А. 612  
Малинина П.И. 247, 274

Малов А.Н. 276, 538  
Мамбетова К.М. 38  
Мамрашев А.А. 60  
Манулик Е.В. 64  
Мануковская Д.В. 310  
Манцызов Б.И. 46  
Маринин А.А. 592  
Маркова М.Д. 548  
Мартынов Г.Н. 191  
Мартынов И.Л. 122, 296, 334  
Мартынова Д.А. 624  
Масальский Н.В. 148  
Матвеева К.И. 410  
Маурер И.А. 386  
Мацак И.С. 255  
Машкович Е.А. 40  
Медведев С.В. 195  
Мелехов А.П. 512  
Мельник М.В. 167  
Менделеев В.Я. 620  
Менсов С.Н. 134, 578, 628  
Меркулов А.В. 582  
Метлин М.Т. 116  
Метлина Д.А. 116  
Мешков О.И. 211, 520  
Мещеряков В.Д. 552  
Минаев Н.В. 132, 526  
Минаева Е.Д. 249, 654  
Миньков К.Н. 213  
Миронова Т.В. 128  
Митетело Н.В. 124  
Митюрева А.А. 72, 468  
Митягин Ю.А. 496  
Мишина И.В. 516  
Могильный В.В. 62, 388  
Можаев Р.К. 582  
Мокроусова Д.В. 484, 486  
Молодцов Д.Ю. 650  
Молодяков С.А. 92  
Молчанов В.Я. 30  
Молчанова А.Д. 328, 436  
Морозов А.Б. 638  
Морозов А.В. 261  
Морятов А.А. 550  
Мошкина Е.М. 436  
Мошкина М.Д. 322  
Моцев И.С. 257  
Муравский Ал.Ан. 62  
Муравский Ан.Ал. 62

Мурадова А.С. 402  
Мурзина Т.В. 46, 124  
Мухамадиев А.А. 94  
Мысина Н.Ю. 612  
Мыслицкая Н.А. 452  
Мяготин А.В. 412, 460  
Мякинин О.О. 544, 550, 626

**-Н-**

Наговицын В.В. 620  
Надолинский А.М. 474  
Найден Л.А. 270  
Налбандян В.М. 414  
Налбантов Н.Н. 42  
Налегаев С.С. 268, 534  
Небаевский В.А. 98, 358  
Нежевено Е.С. 235  
Некрасов А.Д. 64  
Непомнящая Э.К. 454, 456  
Несмелов С.Н. 378, 380  
Никитин В.А. 570  
Никитин Д.Г. 207  
Никитин П.А. 346  
Николаев Д.А. 490  
Николаев Н.А. 60  
Никонов В.И. 177  
Никоноров Н.В. 444  
Новиков В.Б. 46  
Новикова Е.А. 538  
Новикова Ю.А. 428  
Носов П.А. 191

**-О-**

Обидин А.З. 500  
Образцова Е.Д. 434  
Обрывкин А.С. 181  
Овеченко Д.С. 422  
Огородников Л.Л. 193  
Одинокос С.Б. 152, 270, 274, 280, 632  
Оленин А.Л. 616  
Ольнев А.А. 518  
Онищук С.А. 402  
Орехов И.О. 480  
Орликов Л.Н. 38  
Орлов В.М. 215  
Осипов А.В. 161  
Осипов В.Г. 358  
Осипов Е.В. 122, 334  
Очиров Б.Д. 526

**-П-**

Павлов А.В. 239  
Павлов И.Н. 217, 229, 634  
Павлов Н.Н. 102  
Павлов П.В. 276  
Палатников М.Н. 36, 304, 306, 310,  
312, 318, 320  
Панкин П.С. 52, 300  
Панченко В.Я. 205  
Парагачёв И.А. 48  
Патрикеев В.Е. 638  
Перескоков В.С. 556  
Перков Ю.О. 384  
Першин С.М. 128  
Пестов Ю.И. 221  
Петникова В.М. 165, 558  
Петров Н.В. 264, 268, 340, 352, 566,  
614, 642, 652  
Петров Н.И. 90, 360  
Петров Ю.С. 590  
Петрова Е.К. 128  
Петрова Е.К. 618  
Печенкин А.А. 150  
Пикуль О.Ю. 318  
Пирязев И.Н. 496, 498  
Пичугин И.С. 70, 438  
Плеханов А.А. 199, 496, 498  
Плёткин А.П. 356  
Пливак С.А. 104, 514  
Плоскирев А.Е. 364  
Пнев А.Б. 480  
Погодина В.А. 312  
Полетаев Д.А. 340, 614  
Половцев И.Г. 616  
Полтаев Ю.А. 506, 508  
Полуштайцев Ю.В. 134, 578, 628  
Пономарев Н.М. 618, 636  
Пономаренко С.А. 106  
Попов В.В. 360  
Попов Н.Л. 231  
Попов Ф.Н. 276  
Попова А.В. 32  
Попова М.Н. 120  
Пороховниченко Д.Л. 84, 344  
Порошин Н.О. 66  
Постников В.А. 282  
Потапов В.Т. 189  
Потатуркин О.И. 60  
Праведников С.И. 546

Проклов В.В. 608  
Прокопие Н.Н. 306, 320  
Проколова Д.В. 594  
Прохоров А.В. 171  
Прудников И.Р. 294  
Прямыков А.Д. 187  
Пугачев Д.Ю. 406  
Пустовойт В.И. 90  
Пустозеров А.В. 314  
Путилин А.Н. 261  
Путилин С.Э. 268, 534  
Пятченков С.В. 74

**-Р-**

Разуваев А.Е. 600  
Расин А.Б. 392  
Резикян А.Г. 72  
Репин В.Э. 207  
Ринкевичюс Б.С. 217, 229, 634  
Рогалин В.Е. 524  
Рогов П.Ю. 534  
Рогожин М.В. 524  
Рогожников Г.С. 516, 522  
Родин В.Г. 650, 654  
Романишкин И.Д. 540  
Романов В.В. 516, 522, 528  
Ромашко Р.В. 288  
Ромашук Е.В. 374  
Руднев П.О. 416  
Ружицкая Д.Д. 144  
Русинов А.П. 418  
Рыбалтовский А.О. 502  
Рыбась А.Ф. 348, 566, 568  
Рыжиков П.С. 558  
Рыжиков С.Б. 144  
Рыжикова Ю.В. 144  
Рымкевич В.С. 508  
Рыскин А.И. 284  
Рябов К.Д. 626  
Рябухо В.П. 227, 278, 612  
Рябухо П.В. 612  
Рябушкин О.А. 28  
Рябченко В.Ю. 314  
Рябчук С.В. 484, 486

**-С-**

Савельев М.В. 179  
Савченко Е.А. 456  
Сагателян Г.Р. 152

Саенко И.И. 92  
Сазонкин С.Г. 480  
Салахов М.Х. 126, 298, 424, 426  
Салецкий А.М. 112  
Самойленко А.А. 213  
Самцов М.П. 76  
Самусев А.К. 26  
Саркыт А. 302  
Сафронова П.К. 302  
Сафутин А.Е. 209  
Сахаров В.К. 584  
Свяховский С.Е. 112, 124, 300  
Селезнев Л.В. 484  
Семенова В.А. 181  
Семенцов Д.И. 564  
Селюков А.С. 390, 394, 398  
Сергеев М.М. 506, 508  
Серебренников Л.Я. 48  
Сидоров А.И. 338, 440, 446, 448, 450  
Сидоров Н.В. 35, 304, 306, 310, 312,  
318, 320  
Синев Д.А. 478  
Скворцов Е.А. 354, 364  
Скобников В.А. 560  
Скоротецкий М.С. 106  
Скрябин Н.Н. 118  
Слежкин В.А. 430, 452  
Слободянюк К.А. 324, 326  
Смирнов А.А. 518  
Смирнов В.В. 72, 468  
Смирнов В.В. 504  
Смирнов С.В. 332  
Соколенко Б.В. 340, 614  
Соколов П.П. 576  
Соколов Ю.М. 233, 586  
Соловей В.Р. 394, 398  
Соловьев В.Г. 140  
Солякин И.В. 358  
Сорокин Ю.В. 201  
Станкевич А.И. 62, 388  
Стариков Р.С. 98, 253, 358, 618, 636,  
644  
Стахарный С.А. 582  
Степанищев В.В. 492  
Степанов В.А. 223  
Столярчук М.В. 440, 446  
Строганова Е.В. 42, 316  
Строков М.А. 128  
Строкова Ю.А. 112

Суетин Н.В. 233, 586  
Сукачев Д.Д. 74  
Сулейманов Г.М. 638  
Султанов А.Х. 100  
Султанов Т.Т. 282  
Сунчугашева Е.С. 484, 486  
Сурин Н.М. 106  
Сычугин С.А. 40  
Сүй А.В. 32, 306, 312, 320

**-Т-**

Тайдаков И.В. 114, 116  
Талайкова Н.А. 227  
Талалаев В.Е. 274  
Тарабрин М.К. 197  
Тарасов Д.С. 76  
Таргоний А.А. 324, 326  
Тархов М.А. 132  
Теплякова Н.А. 304, 318  
Тимашев П.С. 526  
Тимофеев А.А. 138  
Тимченко Е.В. 542, 546, 548, 552, 554  
Тимченко П.Е. 542, 546, 548, 552, 554  
Тихомирова Н.С. 430  
Тихонов Р.В. 354  
Ткаченко Н.Б. 406  
Толкачев А.В. 229  
Толстик А.Л. 259  
Толстов Е.В. 32  
Томилов С.М. 197  
Трапезников Д.С. 554  
Третьяков С.А. 324, 326, 336  
Трибельский М.И. 154  
Трофимов Н.С. 78  
Трофимова А.В. 388  
Троць К.И. 444  
Трухина А.И. 136, 362  
Трушников И.А. 302  
Тугаенко В.Ю. 255, 600  
Туров А.А. 642  
Тыртышный В.А. 207

**-У-**

Уколов Д.С. 150  
Уманская С.Ф. 376  
Усевич Б.А. 360  
Устиновский Н.Н. 484  
Уэлч Г.Ч. 58

**-Ф-**

Фадаиян А.Р. 510  
Фарион И.А. 526  
Фаррахова Д.С. 536  
Фатхутдинова Л.И. 454  
Федорков В.Г. 518  
Федоров В.А. 342  
Федоров Д.Л. 604  
Федорова Я.В. 546  
Федотов П.В. 434  
Фетисов Ю.К. 225  
Филатов А.Л. 88  
Фишман А.И. 126, 424, 426  
Фролов О.О. 552  
Фунтиков В.А. 532

**-Х-**

Халилов С.И. 348, 568  
Халяпин В.А. 470  
Хамадеев М.А. 50  
Харинцев С.С. 126, 396, 424, 426  
Харитонов А.В. 126  
Хафизов И.Ж. 492  
Хендсби А.Д. 58  
Хижняк Р.В. 590  
Хмелев А.Ю. 338  
Холхоев Б.Ч. 526  
Холёрский А.Н. 474  
Хорьков К.С. 161  
Храмов А.Г. 626  
Христофорова Ю.А. 544  
Худяков Д.В. 118  
Худякова Е.С. 332

**-Ц-**

Цветков В.Б. 490  
Цибулькикова А.В. 185, 452  
Цыбин О.Ю. 456  
Цыганов И.К. 270  
Цыганок В.В. 74  
Цыпкин А.Н. 167

**-Ч-**

Чаймарданов П.А. 183, 366  
Черёмхин П.А. 253, 358, 644, 648,  
650, 654  
Чернаков Д.И. 440  
Чернега Н.В. 128  
Чернов А.И. 434

Черных Е.А. 424  
Черняк М.Е. 582  
Чехлова Т.К. 78  
Чжэн Ч.-Ж. 268, 534  
Чистяков А.А. 122, 199, 296, 334,  
496, 498  
Чубич Д.А. 130  
Чумаков А.И. 150  
Чуманов М.В. 48  
Чусовитин Е.А. 392

**-Ш-**

Шалковская П.Ю. 554  
Шаматова А.И. 490  
Шамина Л.А. 550  
Шандаров В.М. 302, 308, 314, 572  
Шандаров С.М. 38, 286, 322, 332  
Шандрюк Н.Г. 173  
Шапиро Б.И. 64  
Шарова А.С. 540  
Шаульский Д.В. 588, 618  
Шашков Е.В. 211  
Шведова О.В. 600  
Шевкунов И.А. 264, 268, 340, 352,  
566, 614  
Шевченко М.А. 282  
Шелестов Д.А. 197  
Шеляков А.В. 138  
Шепелевич В.В. 286  
Шестериков А.В. 171  
Шифрина А.В. 640  
Шишова М.В. 280

Шкердин Г.Н. 245  
Шкурак И.Н. 390  
Шмелин П.С. 66  
Шувалов В.В. 558  
Шумилин А.С. 104, 514  
Шутов А.В. 484, 486

**-Щ-**

Щелев М.Я. 211, 520  
Щербakov А.А. 237  
Щукарев И.А. 580

**-Э-**

**-Ю-**

Юрина У.В. 338  
Юрковец Е.В. 428  
Юсупов В.И. 502  
Юшков К.Б. 30

**-Я-**

Яворский М.А. 82, 562  
Ягофарова Е.Ф. 548  
Ядвичук А.В. 558  
Яковенко Н.А. 570, 574  
Якунин В.П. 494, 532  
Якушенков П.О. 146  
Ян Д.Т. 392  
Яценко Ю.П. 187